



UNIVERSIDAD DE CUENCA

**Facultad de Ciencias Químicas
Carrera de Ingeniería Ambiental**

**Evaluación de eventos extremos de emisión de dióxido de carbono del ecosistema
de páramo de Zhurucay (Azuay) según condiciones biofísicas y climáticas.**

Trabajo de titulación previo a la obtención
del título de Ingeniera Ambiental

AUTORA:

Kristi Marcela Padrón Flasher
CI: 0104159355
kristipadronf@gmail.com

DIRECTOR:

Ing. Galo Jose Carrillo Rojas, PhD.
CI: 0101799096

CUENCA – ECUADOR

31-julio-2020

RESUMEN

Los flujos de carbono, agua y energía entre la superficie terrestre y la atmósfera están regidos por condiciones biofísicas y climáticas. La presente investigación tiene como objetivo determinar la relación existente entre estas condiciones y eventos extremos de emisión de dióxido de carbono (CO₂) en el páramo de Zhurucay. Para ello se ha contado con datos obtenidos de una torre de Covarianza de Remolinos (Eddy Covariance, EC) y sensores micro-meteorológicos. El sistema EC recolectó datos de estos flujos ininterrumpidamente (día y noche), facilitando la comprensión de los procesos de producción primaria de la vegetación y respiración en el ecosistema. Mediante un análisis estadístico multivariado de 2 años (2017 y 2018) de datos, se demostró que la emisión de CO₂ está principalmente controlada por la temperatura del aire, temperatura del suelo y humedad del suelo, con coeficientes de correlación de 0.59, 0.68 y -0.44 respectivamente. Los resultados indican que en los eventos extremos de emisión de CO₂ (respiración mayor al percentil P₉₀ (> 4.09 gC m⁻² día⁻¹)) la temperatura del aire se relaciona inversamente con este proceso, inhibiéndolo; mientras que, no se encuentra relación significativa entre la temperatura y humedad del suelo con la respiración. Los hallazgos de este estudio contribuyen al conocimiento sobre los procesos de intercambio superficie-atmósfera del ecosistema de páramo, mismos que aún permanecen poco explorados.

Aspectos destacados

- El páramo de Zhurucay actúa como una fuente de CO₂ hacia la atmósfera, en comparación a ecosistemas como praderas y pastizales.
- Las variables biofísicas y climáticas de mayor influencia sobre la respiración ecosistémica son la temperatura del aire, la humedad y la temperatura del suelo.
- En eventos extremos de emisión de CO₂, solamente la temperatura del aire tiene una correlación significativa con la respiración.
- El proceso de respiración ecosistémica responde inmediatamente a cambios en la temperatura del suelo.

Palabras clave: Covarianza de Remolinos. Respiración ecosistémica. Temperatura del aire. Temperatura del suelo. Humedad del suelo. Zhurucay.

ABSTRACT

Carbon dioxide, water and energy flux densities between land and the atmosphere are governed by biophysical and climatic factors. The main goal of this thesis is to determine the relationship between these factors and extreme events of carbon dioxide (CO₂) emission in the Andean páramo of Zhurucay. For this purpose, data from an Eddy Covariance tower and micro meteorological sensors have been used. The Eddy Covariance system collected flux data continuously (day and night), enabling the study of gross primary production and ecosystem respiration processes. A multivariate statistical analysis of two years of data (2017 and 2018) shows that carbon dioxide emission is mainly controlled by air temperature, soil temperature and soil water content, with correlation coefficients of 0.59, 0.68 and -0.44 respectively. In extreme events of CO₂ emission (respiration values greater than the P₉₀ percentile ($> 4.09 \text{ gC m}^{-2} \text{ day}^{-1}$)), air temperature is inversely correlated with respiration, inhibiting its process; whereas there is no significant correlation of respiration with soil temperature or soil water content. This study is a step forward for improving the understanding of land-atmosphere exchange processes in the Andean páramo ecosystem, which remain underexplored.

Highlights

- The Zhurucay páramo acts as a source of CO₂ to the atmosphere, in comparison to meadow and grassland ecosystems.
- Air temperature, soil water content and soil temperature are the most influential biophysical and climatic variables that affect ecosystem respiration.
- In extreme events of CO₂ emission, only air temperature has a significant correlation with ecosystem respiration.
- The ecosystem respiration process immediately responds to changes in soil temperature.

Keywords: Eddy Covariance. Ecosystem respiration. Air temperature. Soil temperature. Soil water content. Zhurucay.



CONTENIDO

RESUMEN	2
ABSTRACT.....	3
AGRADECIMIENTO	8
1 INTRODUCCIÓN	9
1.1 Justificación.....	9
1.2 Pregunta de Investigación	10
1.3 Objetivos	10
1.3.1 Objetivo General:	10
1.3.2 Objetivos Específicos:	10
2 CONTENIDO TEÓRICO.....	10
2.1 Terminología general: NEE, GPP y Reco	10
2.2 Respiración ecosistémica	11
2.3 Medición del flujo de carbono	13
2.4 Ecosistema de páramo.....	16
2.5 Estado del arte	17
3 METODOLOGÍA	20
3.1 Zona de estudio	20
3.2 Adquisición de datos	21
3.3 Procesamiento de información	25
3.4 Construcción de la base de datos	26
3.5 Análisis estadístico multivariado	26
4 RESULTADOS	27
4.1 Análisis de Correlogramas: Flujo de CO ₂ vs variables biofísicas y climáticas.....	27
4.2 Interpretación de la relación entre variables de interés y flujos de respiración	32
4.3 Análisis de correlogramas cruzados.....	36
5 DISCUSIÓN	38
6 CONCLUSIONES	39
7 INVESTIGACIONES FUTURAS	40
8 REFERENCIAS.....	42
9 ANEXOS	50
Apéndice A. Correlogramas de Spearman	50
Apéndice B. Comportamiento de las variables de interés.....	57
Apéndice C. Correlaciones cruzadas.....	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de ecosistemas según flujo neto de CO ₂ . A) Reserva de carbono: GPP > Reco. B) Fuente de carbono: Reco > GPP.....	11
Figura 2. Principio del sistema Covarianza de Remolinos.	15
Figura 3. A) Localización de la zona de estudio en Ecuador. B) Cuenca de Zhurucay, (coordenadas: UTM zona 17S).	21
Figura 4. Observatorio Ecohidrológico de Zhurucay. A) Estación climática. B) Torre de Covarianza de Remolinos.	24
Figura 5. Correlograma de Spearman para Reco, Rs, RH, VPD, Gsoil, Tair, Tsoil, SWC y P con datos del período de estudio completo.....	27
Figura 6. Correlogramas de Spearman para Reco < P ₁₀ , Reco < P ₂₅ , Reco > P ₇₅ y Reco > P ₉₀	31
Figura 7. Correlaciones de Spearman entre Reco y las variables de estudio (SWC, Tair y Tsoil).	32
Figura 8. Evolución temporal diaria de SWC, Tair, Tsoil y Reco para febrero y agosto 2017.	33
Figura 9. Evolución temporal horaria de SWC, Tair, Tsoil y Reco para tres días de alta Reco.	35
Figura 10. Correlaciones cruzadas entre Reco con SWC y Tair en días de alta Reco. ..	37

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Instrumentación usada en la investigación.	23
Tabla 2. Porcentaje de datos vacíos de las variables climáticas.	26
Tabla 3. Percentiles P ₁₀ , P ₂₅ , P ₅₀ , P ₇₅ , y P ₉₀ , valores mínimos y máximos de Reco, Tair, Tsoil y SWC.....	28



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Kristi Marcela Padrón Flasher en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Evaluación de eventos extremos de emisión de dióxido de carbono del ecosistema de páramo de Zhuruay (Azuay) según condiciones biofísicas y climáticas", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 31 de julio del 2020

Kristi Marcela Padrón Flasher

C.I.: 0104159355



Cláusula de Propiedad Intelectual

Kristi Marcela Padrón Flasher, autora del trabajo de titulación "Evaluación de eventos extremos de emisión de dióxido de carbono del ecosistema de páramo de Zhuruca (Azuay) según condiciones biofísicas y climáticas", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 31 de julio del 2020

Kristi Marcela Padrón Flasher

C.I.: 0104159355



AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme fuerzas y sabiduría en todo momento, por ser Él quien me ha permitido concluir esta investigación satisfactoriamente.

Agradezco profunda y sinceramente a todos quienes contribuyeron para el desarrollo de esta investigación. Un reconocimiento especial al Ing. Galo Carrillo Rojas por su apoyo, enseñanzas, paciencia y solidaridad durante todo este proceso. De igual manera, agradezco al Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales de la Universidad de Cuenca por haberme facilitado la información necesaria para llevar a cabo este estudio.

A mis padres, hermanos y sobrino, gracias por ser mi ejemplo a seguir y mi inspiración todos los días. Gracias por compartir conmigo sus valiosos conocimientos y por todo el apoyo que he recibido durante esta etapa.

A mi familia y amigos, gracias por confiar en mí y ser mi soporte incondicional. Gracias por todos sus consejos que han contribuido para la mejora de este estudio.

Kristi Marcela Padrón Flasher.

Cuenca, julio 2020.

“EDUCATION WITHOUT VALUES, AS USEFUL AS IT IS, SEEMS RATHER TO MAKE
MAN A MORE CLEVER DEVIL”.

–C.S. Lewis

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Justificación

El calentamiento global está ocasionado por la acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera (principalmente dióxido de carbono CO₂) que causan un incremento en la temperatura promedio del planeta; por ende es una de las mayores perturbaciones que enfrenta el planeta y la humanidad entera (Chan, 2018). En este contexto, resulta necesario mencionar que la vegetación terrestre y acuática de los ecosistemas actúa como sumidero de carbono, y es crítico definir si un sistema emite o captura CO₂ hacia o desde la atmósfera.

Los páramos son ecosistemas específicos, cuya altitud varía entre 2800 y 4700 m s.n.m. Las bajas temperaturas durante la noche y las condiciones de saturación de sus suelos, han contribuido para que estos ecosistemas constituyan uno de los sumideros de carbón más importantes de las regiones tropicales (Curiel Yuste et al., 2017; Hofstede, 1999; Poulenard et al., 2003). Sin embargo, los estudios sobre cambio climático, las proyecciones en el incremento de la temperatura promedio anual, así como cambios en la intensidad y frecuencia de precipitaciones, podrían tener fuertes efectos en la habilidad de los ecosistemas andinos para almacenar y retener el carbono, siendo una prioridad su estudio para interpretar la vulnerabilidad de los páramos en escenarios futuros (Curiel Yuste et al., 2017).

La cuantificación del flujo de carbono en ecosistemas de páramo ha ido tomando importancia debido a investigaciones recientes que conciernen al cambio climático, contribuyendo a la obtención de información acerca del rol que desempeñan dichos ecosistemas en el almacenamiento o emisión de carbono (Castañeda-Martín & Montes-Pulido, 2017).

Por todo lo mencionado, resulta evidente la necesidad de determinar los patrones existentes en el clima. Al estudiar las variables climáticas y biofísicas predominantes que intervienen en los procesos de emanación de CO₂ se puede establecer una relación entre ellos, particularmente en eventos de emisión extrema de este gas.

1.2 Pregunta de Investigación

¿Cuáles son las variables biofísicas y climáticas que controlan la emisión de CO₂ y están asociadas a eventos extremos de tal flujo hacia la atmósfera en el ecosistema de páramo de Zhurucay?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General:

Determinar la relación entre eventos extremos de emisión de CO₂ y sus controladores biofísicos y climáticos en el observatorio ecohidrológico de Zhurucay.

1.3.2 Objetivos Específicos:

- Analizar el flujo de carbono existente entre superficie terrestre y atmósfera mediante el sistema Covarianza de Remolinos y sensores micrometeorológicos.
- Determinar el comportamiento de las variables climáticas y biofísicas de interés en el observatorio.
- Interpretar el comportamiento de respiración ecosistémica a nivel diario y horario a través de un análisis estadístico multivariado frente a los factores mencionados en el objetivo anterior.

2 CONTENIDO TEÓRICO

2.1 Terminología general: NEE, GPP y Reco

El intercambio ecosistémico neto (NEE), es el flujo neto de CO₂ desde el ecosistema hacia la atmósfera (emisión de CO₂ = NEE+, captura de CO₂ = NEE-), del cual se pueden derivar los flujos de producción primaria bruta de la vegetación (GPP por sus siglas en inglés) y respiración de los ecosistemas (Reco), siendo $NEE = Reco - GPP$ (Carrillo-Rojas et al., 2019; Chapin et al., 2006).

La GPP de los ecosistemas se refiere a la cantidad total de energía producida por las plantas durante el proceso de fotosíntesis, correspondiente a la masa de carbono por unidad de área y unidad de tiempo. Además, la GPP representa uno de los mayores flujos de CO₂ que controla varias funciones de los ecosistemas, como las interacciones tierra-atmósfera y el secuestro de carbono (Minaya et al., 2018).

Por otra parte, Reco contempla la emanación de CO_2 desde la superficie del suelo (respiración heterótrofa y autótrofa) hacia la atmósfera. Según diversos estudios, las cantidades de CO_2 emitidas por el proceso de respiración podrían ser hasta 10 veces mayores en comparación con las emisiones de combustibles fósiles; siendo de gran importancia para la proyección de las concentraciones del CO_2 como gas de efecto invernadero en la atmósfera (González-Ubierna & Lai, 2019; M. Xu & Shang, 2016; Z. Xu et al., 2015). En la Figura 1 se muestran los tipos de ecosistemas según el flujo neto de CO_2 .

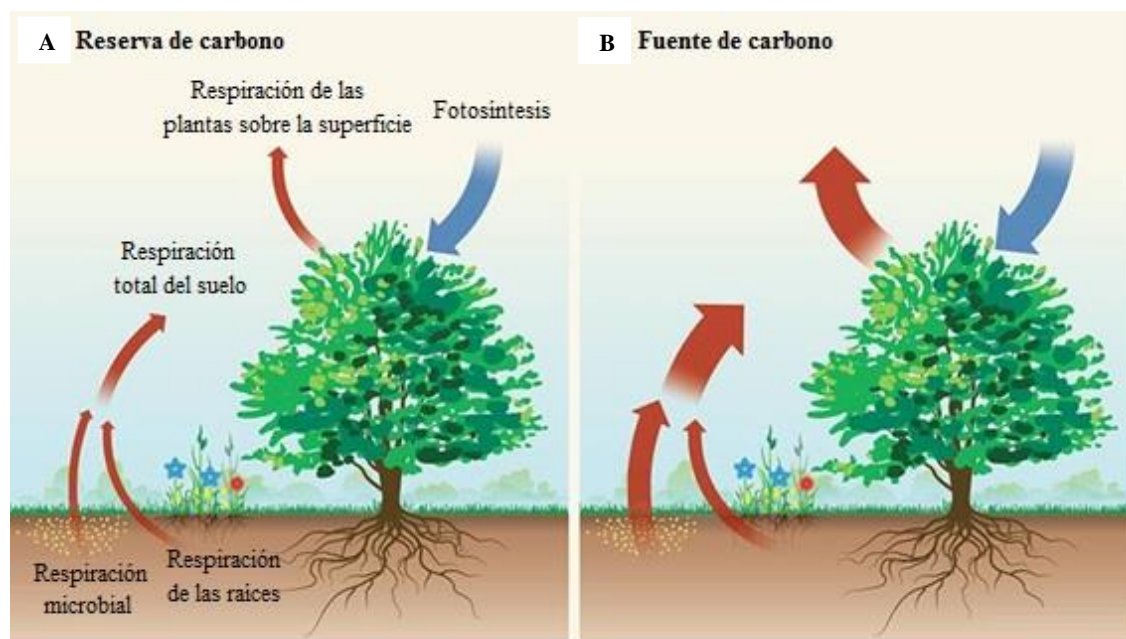


Figura 1. Tipos de ecosistemas según flujo neto de CO_2 . A) Reserva de carbono: $\text{GPP} > \text{Reco}$. B) Fuente de carbono: $\text{Reco} > \text{GPP}$.

Fuente: Modificado de Ogle (2018).

Los procesos de producción primaria y respiración que se han descrito brevemente son sensibles frente a las diferentes condiciones ambientales y variables climáticas, tales como precipitación e incremento de la temperatura (Gessler et al., 2017).

2.2 Respiración ecosistémica

La respiración ecosistémica tiene un rol crítico en la regulación del ciclo del carbono, tanto a escala regional como global. Cada año, la fotosíntesis que realizan las plantas toma aproximadamente $120 \text{ Pg} (10^{15} \text{ g}) \text{ C año}^{-1}$ desde la atmósfera, mientras que el proceso de respiración devuelve a la misma una cantidad similar (Luo & Zhou, 2006b).

Estudios mencionan que globalmente, la respiración del ecosistema devuelve a la atmósfera una cantidad aproximada de $98 \pm 12 \text{ PgC año}^{-1}$, y un pequeño cambio en este

proceso podría provocar cambios drásticos en la concentración de CO₂ atmosférico, y por ende, contribuir al fenómeno de cambio climático (González-Ubierna & Lai, 2019; Han et al., 2007; Yu et al., 2015). El balance neto entre la ganancia de CO₂ debida al proceso de fotosíntesis y la pérdida del gas debido al proceso de respiración, determina el tamaño de los sumideros de carbono a nivel global. Si los niveles de calentamiento incrementan en el planeta, entonces estos sumideros podrían verse afectados, teniendo consecuencias directas en el clima (J. Tang et al., 2019). Este tema es de gran interés en la comunidad científica para determinar la dinámica atmosférica, así como el funcionamiento del sistema terrestre (Luo & Zhou, 2006b). A nivel global, los suelos contienen al menos tres veces la cantidad de carbono que contiene la atmósfera, y al menos cuatro veces y media la cantidad de carbono contenida en la biota mundial (Lajtha et al., 2018).

Las emisiones biológicas de CO₂ provienen de dos fuentes: respiración autótrofa (respiración de plantas) y respiración heterótrofa (respiración microbial). La primera, es aquella producida por la actividad de organismos que son capaces de fijar el CO₂ y convertirlo en moléculas orgánicas generalmente a través del proceso de fotosíntesis. Esta se puede dividir en respiración de las plantas sobre y bajo la superficie, haciendo referencia esta última a la respiración de las raíces. Por otro lado, la respiración heterótrofa hace referencia al CO₂ que se produce por todos los demás organismos del suelo a excepción de las raíces de las plantas (respiración de la biomasa vegetal descompuesta, materia orgánica del suelo, hojarasca y animales del suelo). La distinción que se ha hecho es necesaria, ya que, hay que comprender que los factores que las afectan varían en ambos casos. La respiración autótrofa es regulada por condiciones ambientales sobre la superficie, como la radiación solar o la humedad relativa, mientras que, la respiración heterótrofa puede verse regulada por factores tales como, temperatura y humedad del suelo (Luo & Zhou, 2006b; Phillips & Nickerson, 2015; Yu et al., 2015).

La respiración del ecosistema es un proceso biológico complejo, por lo que es crucial que se analicen tanto los factores bióticos como los factores abióticos que tienen influencia sobre el mismo (Yu et al., 2015). Varios estudios realizados han demostrado que el flujo de carbono se encuentra influenciado y controlado por diversos factores y variables meteorológicas. Los controladores principales de la respiración biológica del suelo son la humedad y temperatura del suelo (González-Ubierna & Lai, 2019; Luo & Zhou, 2006c, 2006d; Phillips & Nickerson, 2015).

Debido a todo aquello que ha sido descrito, y debido a que el calentamiento global y el consecuente cambio climático son los mayores fenómenos a los que se enfrenta la humanidad en la actualidad, resulta imprescindible llevar a cabo investigaciones y desarrollar métodos que permitan cuantificar la respiración ecosistémica. Este tema ya no es de importancia solamente en el ámbito académico, sino también se ha vuelto crucial para temas comerciales, ambientales, económicos, políticos y sociales (Luo & Zhou, 2006a).

2.3 Medición del flujo de carbono

Para la medición del flujo de carbono que ocurre desde la superficie terrestre hacia la atmósfera, se han desarrollado varios métodos que tienen ventajas y desventajas relacionadas a la investigación para la cual estén siendo usados (De Gregorio et al., 2013). Se ha demostrado que para asegurar la calidad de los datos de medición, es esencial usar las técnicas desarrolladas de manera complementaria (Acosta et al., 2019).

Los flujos de gas pueden ser medidos a diferentes escalas espaciales, y para estas escalas existen también diversas técnicas. Para mediciones puntuales, por ejemplo, se usan las cámaras de respiración para medir el intercambio gaseoso, es decir, esta tecnología mide el flujo de CO_2 a nivel de planta o área pequeña de suelo. Estas tienen la gran ventaja de detectar flujos de gases autótrofos y heterótrofos dependiendo de donde se ubique el equipo, y por tanto determinar individualmente estos componentes del ecosistema. Debido a que este método es bastante puntual en sus mediciones, para determinar el flujo de gases de cierta área se requiere un alto número de réplicas (Acosta et al., 2019). Este método es usado en estudios de agricultura, exploración geoquímica o monitoreos volcánicos. Las cámaras cerradas de respiración se basan en la acumulación de gases del suelo en una cámara cilíndrica con volumen conocido, y que se ubica en la superficie del suelo. La tasa de variación de la concentración del gas dentro de la cámara, en este caso, CO_2 , es directamente proporcional al flujo de gas desde el suelo. Un método estático para determinar la concentración del gas se basa en la absorción pasiva de CO_2 en una trampa de álcali por un determinado período. Otra manera, tanto para las cámaras estáticas como dinámicas, es monitorear la concentración del gas en la muestra mediante un analizador de gas infrarrojo IRGA en el que ingresa la misma. La desventaja es que el gas que ingresa puede corroer el instrumento, además que el mismo no es útil en ambientes con condiciones ambientales extremas (Camarda et al., 2009; De Gregorio et al., 2013). Cuando se usa este método, para la estimación de flujos diarios o anuales, se usan

interpolaciones lineales o modelos de regresión (Acosta et al., 2019). Para el alcance del presente estudio, no se tuvieron a disposición cámaras de respiración, por la falta de disponibilidad de dicha tecnología en la Universidad de Cuenca.

El sistema Covarianza de Remolinos, es un método útil para la medición de flujos de gases a nivel de ecosistema completo. La importancia del mismo radica en que provee mediciones continuas las 24 horas del día que pueden ser integradas en diferentes escalas temporales, ya sea, en nivel diario, mensual, estacional o anual. Otra ventaja del método consiste en que puede ser aplicado para la determinación del flujo de gases sobre grandes áreas (Acosta et al., 2019), por lo que generalmente es usado para evaluar el intercambio de carbono de un ecosistema y determinar las emisiones totales del mismo (De Gregorio et al., 2013).

El sistema Covarianza de Remolinos es un método que provee mediciones sobre el flujo de carbono, el cual surgió alrededor de los años 1980-1990, como parte de experimentos micrometeorológicos (Aubinet et al., 2012). Una de las limitaciones que el sistema presenta es que involucra algunas suposiciones; el flujo es totalmente turbulento, las fluctuaciones de densidad de aire son insignificantes, los terrenos en los cuales se instala el equipo son planos y uniformes, entre otros (Baldocchi et al., 2001; Burba, 2013). Sin embargo, la instrumentación y tecnología actual han permitido superar estos retos, aplicando dicha técnica en lugares con condiciones no ideales, como es sobre terrenos complejos, con una posterior aplicación de correcciones matemáticas específicas (Hiller et al., 2008).

Este método ya ha sido ampliamente usado en muchos países con el objetivo de obtener información sobre tan importante tema como es el intercambio neto del ecosistema, el cual es de gran utilidad en las investigaciones del mundo científico. Es así que, desde principios de 1990 ya se instalaron sistemas de Covarianza de Remolinos en bosques caducifolios templados de Estados Unidos y Japón, así como en otros biomas, como son un bosque boreal en una provincia de Canadá, y un bosque de hayas en Italia (Black et al., 1996; Greco & Baldocchi, 1996; Valentini et al., 1996; Yamamoto et al., 1999).

Se continuó con establecer una red de flujo global FLUXNET que permita conocer los flujos de carbono a nivel mundial, para analizar más profunda y detalladamente uno de los principales gases de efecto invernadero CO_2 . Esta red permite entonces unir esfuerzos

que se llevan a cabo alrededor de todo el mundo en una red integrada (Baldocchi et al., 2001).

Gracias a la instrumentación y el avance en la metodología, el sistema se encuentra disponible ahora para cualquier disciplina: ciencia, industria, ambiental, regulaciones de emisiones, entre otros. El sistema Covarianza de Remolinos es uno de los métodos más directos para realizar mediciones de flujos de calor, agua, metano, otros gases traza y para el interés de esta investigación, dióxido de carbono. Es importante saber que la definición de flujo hace referencia a la cantidad de una entidad que se mueve a través de una unidad de área por unidad de tiempo. El funcionamiento del sistema, como se observa en la Figura 2, consiste en considerar al flujo de aire como un flujo horizontal constituido por numerosos remolinos (eddies) de distintos tamaños que rotan, cada uno de ellos con varios componentes que pueden ser medidos desde la torre, entre ellos el movimiento vertical del aire. El principio matemático que fundamenta el método consiste en que el flujo vertical, el cual determina si una superficie actúa como fuente o como sumidero, se representa como la covarianza entre la velocidad vertical del aire y la concentración de la entidad de interés, dicho en otras palabras, desde el punto de vista físico, se refiere a la cantidad de moléculas que se mueven hacia arriba o hacia abajo en el tiempo y a la velocidad con la que lo hacen (Burba, 2013).

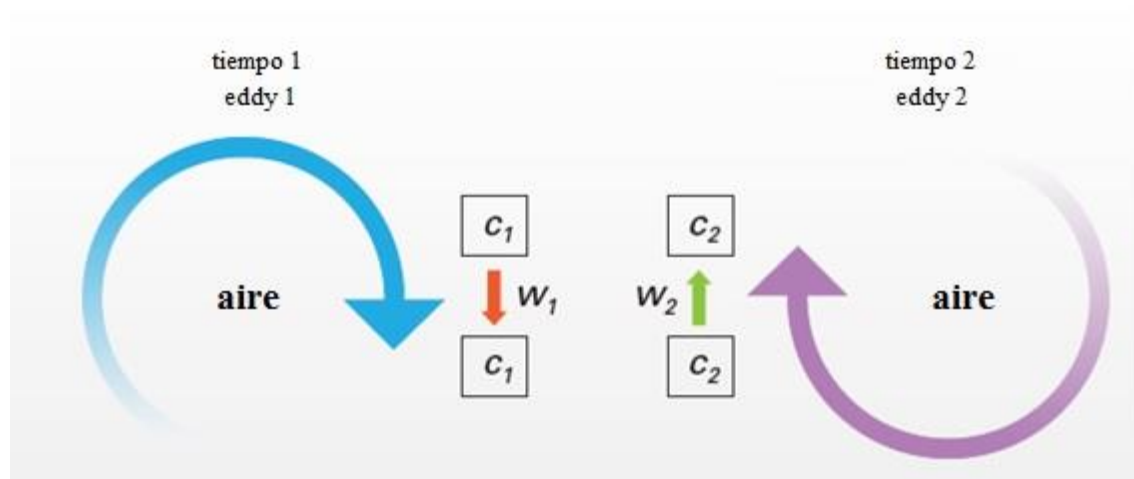


Figura 2. Principio del sistema Covarianza de Remolinos. En el tiempo 1, eddy 1 mueve la parcela de aire c_1 hacia abajo con una velocidad w_1 . En el tiempo 2, en el mismo punto, eddy 2 mueve la parcela de aire c_2 hacia arriba con una velocidad w_2 .

Fuente: Burba (2013).

Las estaciones de Covarianza de Remolinos adicionalmente pueden estar equipadas con instrumentos para medir variables climáticas (precipitación, temperatura, humedad relativa, etc.), las cuales son medidas en el mismo lugar y al mismo tiempo que los flujos de gas, de manera que ayudan a la interpretación de los mismos, así como también se usan para rellenar posibles vacíos en los datos (Burba et al., 2013). Por otra parte, estas variables también pueden ser medidas en las estaciones meteorológicas y sistemas de monitoreo de las propiedades del suelo (p.ej., temperatura, humedad y energía almacenada), las cuales son de gran interés debido a su importancia y funcionalidad en la recolección, organización, almacenamiento y análisis de datos que se obtienen de las mismas (Horsburgh et al., 2011). Mediante los datos recolectados a través de dichos equipamientos es posible conocer y describir, por un lado el comportamiento de las variables meteorológicas que predominan en la zona de estudio y conocer las principales características en el clima que caracteriza la zona, y por otro lado el estado del suelo.

2.4 Ecosistema de páramo

El páramo es un ecosistema natural predominante en los Andes del Norte, que cubre aproximadamente 35000 km², los cuales se distribuyen a través de varios países como son: Venezuela, Colombia, Ecuador, y el norte de Perú; así como también en ciertas regiones en Costa Rica y Panamá; siendo Ecuador el país en el que se encuentra la mayor área de este tipo de ecosistema (Arroyo & Cavieres, 2013; Hofstede & Llambí, 2019; Secretaría General de la Comunidad Andina, 2009).

Los páramos cuentan con características específicas de gran importancia, se encuentran dominados por vegetación como pajonales, plantas cojín, arbustos y pequeños parches de bosques (Vásconez & Hofstede, 2006), vegetación que se caracteriza principalmente por ser capaz de adaptarse a climas extremos (Secretaría General de la Comunidad Andina, 2009). Por otra parte, este ecosistema funciona como medio de regulación de los flujos hídricos y también constituye la principal fuente de agua para las ciudades a las que alimenta ubicadas en los valles andinos; así como también, se lo reconoce por ser un gran almacenador de carbono, lo cual contribuye para la mitigación del cambio climático global (Carrillo-Rojas et al., 2019; Secretaría General de la Comunidad Andina, 2009).

Los páramos además de proveer servicios ecosistémicos de gran importancia, cuentan con una diversidad de especies endémicas, haciendo que el cuidado del páramo sea esencial y prioritario en temas de conservación debido a la importancia ecológica y

económica que representa (Célleri & Feyen, 2009; Secretaría General de la Comunidad Andina, 2009).

Como se mencionó, los páramos son ecosistemas que funcionan como reservas de carbono. A pesar de esto, el proceso de Reco, en el que se emite CO_2 desde la superficie terrestre hacia la atmósfera, todavía requiere de mucho estudio, ya que este flujo no se encuentra comprendido en su totalidad por la comunidad científica como parte del ciclo de carbono global. Recientes investigaciones consideran que el cambio climático provocará mayores tasas de respiración, lo que a su vez contribuirá a un aumento de temperatura a nivel global, sin embargo, esta relación aún no ha sido demostrada (Carey et al., 2016).

2.5 Estado del arte

El proceso de respiración presenta comportamientos diferentes al considerar ciertos umbrales de condiciones climáticas. En un estudio llevado a cabo por Carey et al. (2016), al analizar nueve biomas distintos, se determinó que la tasa de respiración incrementa con la temperatura del suelo hasta que esta alcanza los 25 °C, umbral sobre el cual, las tasas de respiración empiezan a decrecer. Esto se puede explicar en cierta parte, debido a que en estas condiciones la humedad del suelo es baja. Se supone también que este comportamiento se debe a la reducción de la demanda autótrofa por Adenosín trifosfato (ATP), así como de la actividad enzimática, ya que, dichas actividades microbiales ya han llegado a su límite fisiológico térmico (Jia et al., 2020; Lellei-Kovács et al., 2011), sin embargo, este tema no es de pertinencia en la presente investigación debido a que esta no analiza la respiración en un nivel microbiológico. En el mismo estudio se determinó que la humedad interviene en la respuesta de Reco frente a condiciones de temperatura elevada, ya que, usando datos del cuartil más bajo de humedad del suelo, la magnitud de la respuesta de la respiración frente al calentamiento presentó un decrecimiento; es decir, las tasas de respiración fueron menores, a pesar de experimentar mayores temperaturas del suelo (Carey et al., 2016).

Tomando en cuenta la sensibilidad de Reco frente a la temperatura, la mayoría de modelos geoquímicos globales predicen una pérdida de carbono de los suelos como un resultado del calentamiento global. Un análisis llevado a cabo en 17 sitios que definen 4 biomas específicos (Tundra alta, tundra baja, pradera y bosque), demostró que el flujo de CO_2 desde el suelo incrementa cuando los ecosistemas naturales se exponen a un

calentamiento experimental. En promedio, se mostró un incremento de 20 %, correspondiente a $26 \text{ mgC m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ de la respiración frente al calentamiento. A pesar de esto, es importante mencionar que Reco tiene respuestas diferentes dependiendo también de la localidad. Es así que, en ecosistemas fríos de alta latitud, la respuesta de la respiración frente a la temperatura del suelo es mayor que en áreas calientes y templadas. A pesar de las relaciones encontradas en los estudios mencionados, se ha mostrado también una tendencia que la magnitud de la respuesta de la respiración frente al calentamiento decrece con el tiempo, es decir, a largo plazo. Una de las razones para que esto suceda es la aclimatación, fenómeno que produce que las tasas de respiración sean alteradas inicialmente en respuesta a un cambio de temperatura, pero que luego, gradualmente provoca que su valor se ajuste al valor original previo al cambio de temperatura (Luo & Zhou, 2006e).

Un estudio desarrollado en una Reserva Natural en el Suroeste de China, mostró que Reco presenta correlaciones positivas con la temperatura del suelo como ya se ha mencionado, pero también con la temperatura del aire, sin embargo, el coeficiente de correlación en este último fue menor. De todos los factores abióticos que fueron analizados, se determinó que la temperatura del suelo es el factor que afecta más directamente al proceso en cuestión (Yu et al., 2015).

Por otro lado, cabe mencionar la influencia que tiene la radiación solar en el proceso de respiración. Los resultados de una investigación desarrollada en un agroecosistema mostraron que la radiación promueve dicho proceso, debido a que se promueve la fotosíntesis durante el día y provoca una mayor respiración indirectamente (Sun et al., 2010).

Otro estudio llevado a cabo en un ecosistema de páramo de Ecuador determinó que las tasas de flujo de CO_2 son relativamente más altas en situaciones donde la humedad del suelo incrementa de 17 a 55 %, valor a partir del cual la respiración empieza a decrecer (McKnight et al., 2017). Este estudio comprueba la relación conceptual que establece que Reco o el flujo de CO_2 decrece en condiciones secas, alcanza una tasa máxima en niveles intermedios de humedad del suelo, y finalmente, cuando la humedad del suelo es sumamente alta, la respiración se suprime debido a la falta de aireación, cuando prevalecen las condiciones anaeróbicas frente a la actividad microbiana aeróbica. Por el contrario, cuando la humedad del suelo se aproxima a la capacidad de campo, la

respiración se promueve, debido a que, los macroporos se encuentran llenos en su mayoría con aire, facilitando la difusión de O_2 ; mientras que, los microporos se encuentran mayoritariamente llenos de agua, facilitando así la difusión de sustratos solubles (Luo & Zhou, 2006d; Yu et al., 2015). Es decir, la respiración disminuye en condiciones de baja humedad, lo que se atribuye a una posible disminución en el suministro de sustrato de carbono y nitrógeno; y también disminuye en condiciones de extrema humedad cuando el oxígeno es desplazado, reduciendo el suministro de oxígeno a los microbios, provocado por tasas más lentas de difusión a través del agua (Phillips & Nickerson, 2015; Schipper et al., 2019; M. Xu & Shang, 2016).

En definitiva, las perturbaciones tanto naturales como antropogénicas pueden representar consecuencias a nivel de la respiración cuando actúan de manera simultánea, provocando influencias complejas en este proceso. Por ello, resulta imprescindible el examinar los efectos interactivos que se producen en la respiración debido a la intervención de múltiples factores; el efecto de los mismos debe ser estudiado de manera sinérgica, ya que el impacto combinado es mucho más complejo que los impactos que producen individualmente (González-Ubierna & Lai, 2019; Luo & Zhou, 2006e). Reco usualmente responde al factor más limitante. Los factores ambientales de mayor influencia en el proceso de la respiración se atribuyen a la temperatura y humedad del suelo (Han et al., 2007; Sun et al., 2010). Los estudios han demostrado que el proceso de respiración no es sensible a la humedad en condiciones de temperaturas menores a $5\text{ }^{\circ}\text{C}$, sin embargo, sí muestra sensibilidad a este factor cuando la temperatura se encuentra en un rango promedio de $10\text{ a }20\text{ }^{\circ}\text{C}$. De igual manera, la respiración no presenta sensibilidad a la temperatura en condiciones de humedad menor a 7.5% volumétricamente, pero sí lo hace cuando el contenido de humedad se encuentra en un rango de $10\text{ a }25\%$ (Luo & Zhou, 2006d). Analizando estos datos, es posible decir que la relación entre la respiración y la temperatura del suelo, y la respiración con la humedad, varían de acorde a ciertos límites y umbrales de humedad y temperatura respectivamente (González-Ubierna & Lai, 2019).

En los páramos ecuatorianos, información y datos acerca de flujos de carbono han sido recientemente estudiados. Los resultados de la investigación llevada a cabo por Sánchez et al. (2017) en el Parque Nacional Cayambe Coca y en la Reserva Ecológica Antisana, mostraron que el páramo actúa como un almacenador de carbono, siendo GPP superior a Reco en ambos casos, mostrando finalmente un intercambio ecosistémico neto negativo de $-0.69\text{ gC m}^{-2}\text{ h}^{-1}$ y $-1.25\text{ gC m}^{-2}\text{ h}^{-1}$ respectivamente. Las mediciones de flujo de

carbono en este estudio fueron tomadas solamente en el día a través de una cámara de respiración. Por otro lado, Carrillo-Rojas et al. (2019) desarrolló el primer análisis de flujo de carbono en los Andes ecuatorianos usando el sistema Covarianza de Remolinos, permitiendo un monitoreo de flujo de carbono continuo (día/noche) de todo el ecosistema del páramo de Zhurucay. Mediante este estudio, Carrillo-Rojas et al. (2019) contradice los resultados de Sánchez et al. (2017), demostrando que este ecosistema actúa más bien como una fuente de carbono, ya que, las agregaciones diarias de flujo, mostraron valores de NEE predominantemente positivos, con un promedio diario de $+ 0.27 \pm 0.58 \text{ gC m}^{-2} \text{ día}^{-1}$. Por su parte, GPP alcanzó un valor promedio diario de $3.21 \pm 0.86 \text{ gC m}^{-2} \text{ día}^{-1}$; mientras que el valor promedio para Reco fue de $3.48 \pm 0.76 \text{ gC m}^{-2} \text{ día}^{-1}$. Este estudio además, analiza la relación del flujo de carbono con ciertos controladores climáticos y biofísicos, mostrando principalmente una correlación positiva entre la temperatura del suelo con GPP y Reco, y por otro lado, una correlación inversa entre la humedad del suelo con GPP y Reco. Sin embargo, la relación del flujo de carbono con los controladores mencionados en eventos extremos de emisión de dióxido de carbono aún no ha sido explorada, y es justamente en este punto donde radica la importancia de la presente investigación.

3 METODOLOGÍA

3.1 Zona de estudio

La zona de estudio se localiza en el Observatorio Ecohidrológico de Zhurucay, posicionado en la cabecera de la cuenca de Zhurucay, dentro de la Biosfera Macizo del Cajas. Este sitio fue establecido desde el año 2009, con el objetivo de investigar el funcionamiento hidrológico de las cuencas andinas. La cuenca cuenta con una extensión de 7.5 km^2 , se encuentra ubicada entre 3200 y 3900 m s.n.m. y está distanciada de la ciudad de Cuenca por aproximadamente 85 km en dirección suroeste ($3^{\circ}3'S$, $79^{\circ}14'O$) (Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales, 2015; Padrón et al., 2015). (Figura 3).

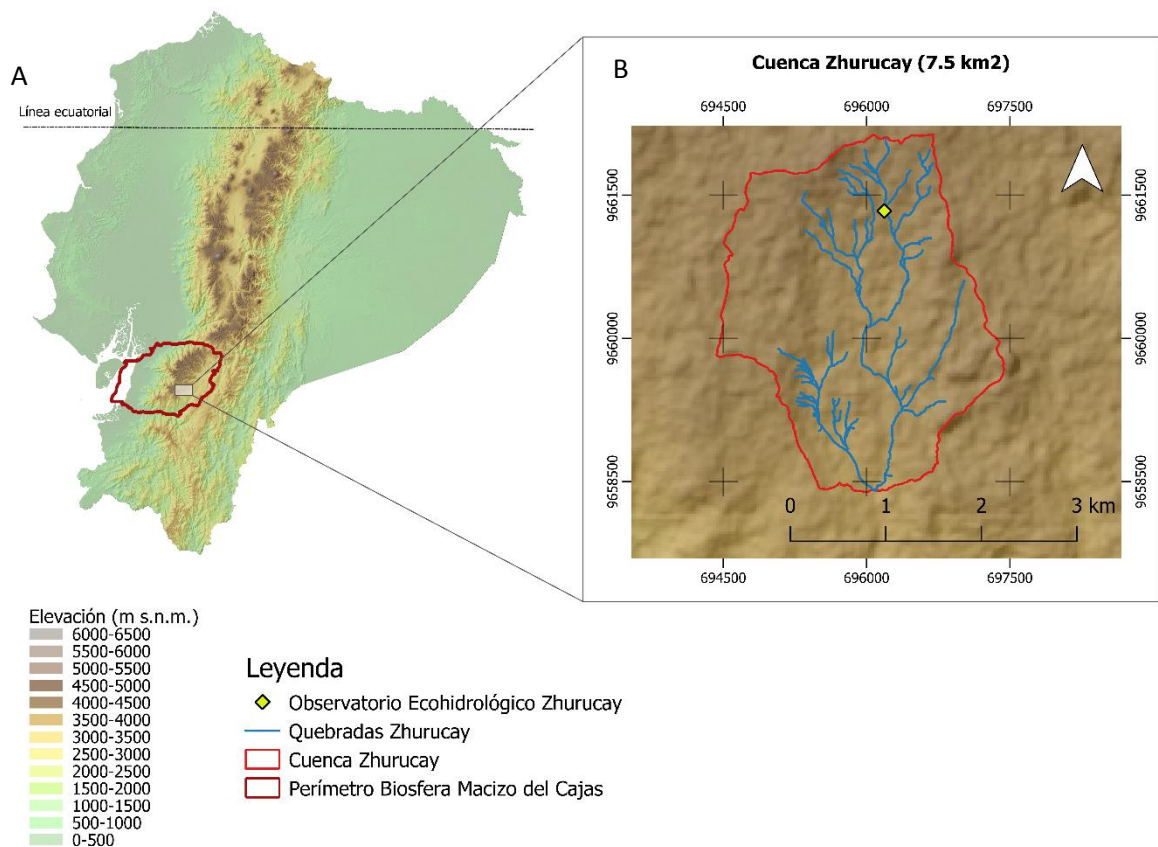


Figura 3. A) Localización de la zona de estudio en Ecuador. B) Cuenca de Zhurucay, (coordenadas: UTM zona 17S).

Fuente: Modificado de Carrillo-Rojas et al. (2020).

3.2 Adquisición de datos

Para la presente investigación se obtuvo información correspondiente a 2 años (2017 y 2018) de datos meteorológicos obtenidos a través de sensores meteorológicos instalados en la estación climática ubicada en la zona de estudio, la cual tiene un área de aproximadamente 14 x 14 metros, con una cerca de 2 metros de alto (Padrón, 2013). Los sensores almacenan datos cada 5 minutos, que pueden ser agregados en diferentes niveles.

Por otra parte, hay que destacar que la torre del sistema Covarianza de Remolinos ubicado en la zona de estudio, a través de la detección de flujo continuo, mide el intercambio ecosistémico neto NEE, por lo cual este fue dividido en sus componentes GPP y Reco. Para ello se usó un modelo de regresión fundamentado en Lloyd & Taylor (1994) entre NEE nocturno y temperatura del suelo, debido a que NEE medido en este período corresponde solo al proceso de respiración. De esta manera, Reco puede ser estimado como una función de la temperatura, pudiendo establecer también los valores diarios de

Reco. Así, GPP se estima como la diferencia entre Reco y NEE. Finalmente, hay que indicar que valores nocturnos de GPP se establecen como 0. Este particionamiento de flujo se hizo usando el paquete de R REddyProc, y los datos de respiración fueron agregados en un nivel diario y para días particulares en un nivel horario. El sistema Covarianza de Remolinos provee la capacidad de registrar datos a través de sensores biológicos y meteorológicos (biomet) adicionales, permitiendo realizar mediciones meteorológicas convencionales y de energía específicas. Los datos en este caso se reportan cada 30 minutos. Los flujos de respiración son calculados usando el software EddyPro (Acosta et al., 2019). Es importante mencionar que estos datos corresponden al período de 2 años (2017 y 2018) que analiza esta investigación.

Para el caso particular de este estudio, las variables biofísicas estudiadas son respiración ecosistémica Reco, calor del suelo Gsoil, temperatura del suelo Tsoil y humedad del suelo SWC; mientras que las variables climáticas comprenden radiación solar Rs, humedad relativa RH, déficit de presión de vapor VPD, temperatura del aire Tair y precipitación P. Los datos usados han sido principalmente los de la biomet, usando la información de la estación climática para rellenar datos faltantes, y específicamente para datos de precipitación. Las características de la instrumentación usada para este estudio se describen detalladamente en la Tabla 1.

El déficit de presión de vapor se calcula a partir de la temperatura del aire y la humedad relativa. La Ecuación 1 representa el cálculo para SVP (presión de vapor saturada) y la Ecuación 2 el cálculo para la variable VPD. Tair se encuentra en °C, y los resultados en Pa.

$$SVP = 610.78 * e^{T_{air}/(T_{air}+238.3)*17.2694} \quad \text{Ec. 1}$$

$$VPD = SVP * \left(1 - \frac{RH}{100}\right) \quad \text{Ec. 2}$$

Tabla 1. Instrumentación usada en la investigación.

	Variable	Tipo de sensor	Unidad
Flujos de CO₂ (sensores rápidos) LI-7550 Unidad de interfaz del analizador y LI-COR 7200-101 Módulo de flujo	Concentración de gas de CO ₂	IRGA de canal cerrado: LI-COR LI-7200	ppm
	Velocidad de viento / Dirección / Temperatura sónica	Anemómetro sónico 3D: GILL-WM	m s ⁻¹
Sensores micrometeorológicos complementarios (sensores lentos) Sutron 9210B Registrador de datos (data logger)	Radiación neta	Radiómetro neto de 4 componentes: Kipp & Zonen CNR4	W m ⁻²
	Calor del suelo	3 Placas de flujo de calor del suelo: Hukseflux HFP01	W m ⁻²
	Humedad y temperatura del suelo	3 Reflectómetros del contenido de agua: Stevens Hydra Probe II	cm ³ cm ⁻³ y °C
	Temperatura del aire y humedad relativa	Termómetro/Higrómetro: Vaisala HMP155 + escudo de radiación	°C y % RH
Estación climática automática (AWS) (Zhuruca) Campbell CR1000 Registrador de datos (data logger)	Radiación solar total	Piranómetro: Campbell CS300	W m ⁻²
	Temperatura del aire y humedad relativa	Termómetro/Higrómetro: Campbell CS-215 + escudo de radiación	°C y % RH
	Precipitación	Pluviómetro: Texas TE525MM Cubeta basculante con protección contra el viento	mm

Fuente: Modificado de Carrillo-Rojas et al. (2019).

En la Figura 4 se observan fotografías de los instrumentos y equipos usados, ubicados en el sitio de estudio.

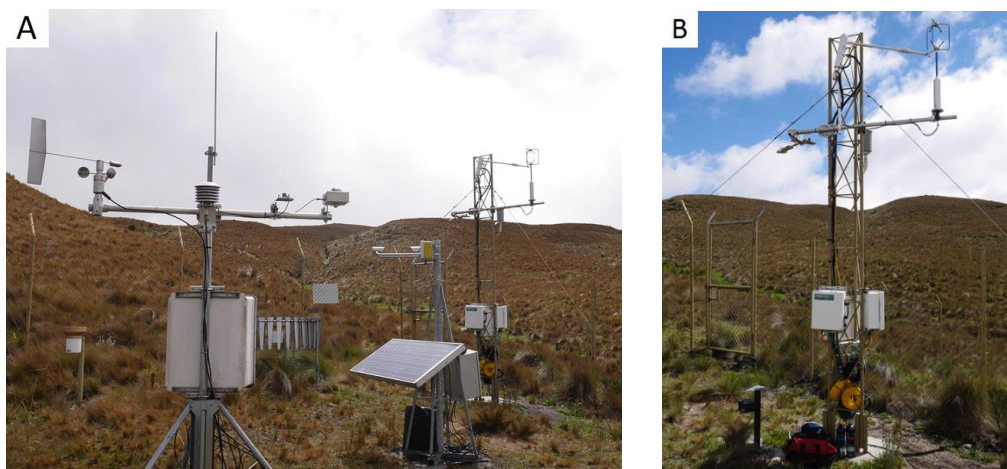


Figura 4. Observatorio Ecohidrológico de Zhurucay. A) Estación climática. B) Torre de Covarianza de Remolinos.

Fuente: Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales (2018).

Con respecto al clima de la zona de estudio, en investigaciones anteriores se ha mencionado que la precipitación anual en el lugar varía entre 900 y 1600 mm, con una estacionalidad poco marcada. Por otra parte, el clima de la región es fuertemente afectado e influenciado por las corrientes oceánicas y atmosféricas provenientes tanto del oeste como del este, lo cual provoca que el clima sea predominantemente frío con precipitaciones casi diarias. En cuanto a temperatura del aire, el promedio varía alrededor de 7 °C y su gradiente térmico ambiental es de 0.5 °C a 0.7 °C por cada 100 m en altura. En cuanto se refiere a geología, principalmente corresponde a las formaciones de Quimsacocha y Turi del período del Mioceno. De acuerdo a la clasificación de suelos de la FAO, los suelos predominantes en el sitio de estudio son del tipo Histosoles y Andosoles, indicando un gran contenido de materia orgánica contenido entre 0.44 a 0.84 kg kg_{suelo}⁻¹, así como también, alta porosidad entre 39 y 90 %, y gran capacidad de infiltración y retención de agua. Para el área los Andosoles se desarrollan entre 0.24 y 0.44 m y los Histosoles entre 0.24 y 0.70 m (Carrillo-Rojas et al., 2019; Mosquera et al., 2015). La temperatura del suelo en el sitio de estudio es de gran interés, debido a su importancia para la actividad de la vegetación y de microorganismos, lo cual afecta el flujo de carbono existente entre el suelo y la atmósfera (Jeong et al., 2017). Se sabe entonces que el clima ecuatorial de altitudes de páramo tiene por lo general bajas temperaturas, baja presión atmosférica, nubosidad dominante y alta precipitación,

contribuyendo a bajas tasas de descomposición microbiana del suelo, retención de materia orgánica y horizontes de suelo A muy gruesos. Como resultado de esto, los suelos de los páramos ecuatorianos son capaces de almacenar hasta 77 toneladas de carbón por cada hectárea de terreno en los primeros 10 cm de suelo (McKnight et al., 2017; Munoz et al., 2015). Otras investigaciones indican que la humedad relativa del aire es superior al 90 % y el nivel de la radiación solar es 4942 MJ m^{-2} por año (Carrillo-Rojas et al., 2019).

De acuerdo a los datos obtenidos de los sensores de la estación climática y de la torre del sistema de Covarianza de Remolinos, se determinó que el valor de temperatura promedio del aire durante el período analizado es de $6.46 \text{ }^{\circ}\text{C}$, sin embargo, el rango de variación entre la máxima y mínima temperatura promedio cada 30 minutos puede llegar a ser hasta de $13.62 \text{ }^{\circ}\text{C}$ en un mismo día. En cuanto a la humedad relativa, esta muestra un promedio de 89.63 % durante el período de estudio. La radiación solar por su parte presenta un promedio de 160.12 W m^{-2} . Todos los datos presentados muestran una fuerte consistencia con la bibliografía revisada. En cuanto a respiración, el valor total para el período de análisis es de $2390.41 \text{ gC m}^{-2}$.

3.3 Procesamiento de información

Los datos que fueron tomados respectivamente de los sensores requieren un proceso de análisis y un control de calidad de los mismos. Para ello, en primer lugar se hizo una depuración de los datos a ser usados posteriormente para el desarrollo de la investigación. Se encontró la existencia de datos faltantes en ciertos días para radiación solar, humedad relativa, déficit de presión de vapor y precipitación, como se observa en la Tabla 2. Se usó el software RStudio y a través del paquete de R REddyProc se hizo un relleno de datos de las variables climáticas faltantes usando la técnica de Muestreo de Distribución Marginal (MDS por sus siglas en inglés). Esta técnica considera tanto la covarianza de los flujos con las variables meteorológicas como la autocorrelación temporal de los flujos; así, MDS rellena datos vacíos utilizando una ventana de tiempo de varios días adyacentes, cuya duración depende de la disponibilidad de datos meteorológicos (Reichstein et al., 2005; Serrano-Ortiz et al., 2009; Wutzler et al., 2018).

Tabla 2. Porcentaje de datos vacíos de las variables climáticas.

Variable climática	Vacíos de datos (%)
Radiación solar	2.46
Humedad relativa	0.39
Déficit de presión de vapor	0.39
Precipitación	3.84

Fuente: Autora, 2020.

3.4 Construcción de la base de datos

Una vez rellenos los datos, se procedió a hacer las transformaciones de unidades debidas para continuar con el análisis de la investigación. Es así que, los datos de respiración fueron transformados de $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ a $\text{gC m}^{-2} \text{h}^{-1}$ mediante la Ecuación 3, y posteriormente todas las variables de estudio fueron agregadas a un nivel diario para explorar los flujos de carbono existentes en este período de tiempo. Por otra parte, se trabajó a un nivel subdiario en aquellos días que presentaron una mayor cantidad de flujo de carbono desde la superficie terrestre hacia la atmósfera, así como en los meses de febrero y agosto de 2017, considerados como un mes húmedo y un mes seco respectivamente.

$$\text{Reco } \text{gC m}^{-2} 30 \text{ min}^{-1} = \frac{\text{Reco } \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1} * (3600 * 24 * 12.011)}{1000000 * 48} \quad \text{Ec. 3}$$

Una vez agregados los datos de respiración cada 30 minutos, estos son acumulados a nivel diario.

3.5 Análisis estadístico multivariado

Se procedió a trabajar con los datos organizados en el software RStudio, en el cual se llevó a cabo un análisis estadístico multivariado a través de una representación de correlaciones entre las variables de interés en el estudio, así como un análisis de correlaciones cruzadas. Para este análisis, se consideraron las tres relaciones más fuertes con Reco, las cuales tienen un valor $p < 0.05$, (correspondiente a una significancia mayor a 95 %).

4 RESULTADOS

4.1 Análisis de Correlogramas: Flujo de CO₂ vs variables biofísicas y climáticas

Mediante el análisis llevado a cabo en RStudio con toda la base de datos agregados en un nivel diario, se usó el coeficiente de correlación de Spearman, y se determinó que Reco presenta mayores relaciones con la temperatura del aire, temperatura del suelo y contenido de humedad del suelo (Tair, Tsoil y SWC), con valores de 0.59, 0.68 y -0.44 respectivamente. Los resultados también indicaron que la temperatura del aire y suelo presentan una relación directa entre ellas de 0.79, mientras que estas tienen una relación inversa con SWC de -0.38 y -0.48 respectivamente, como se observa en la Figura 5.

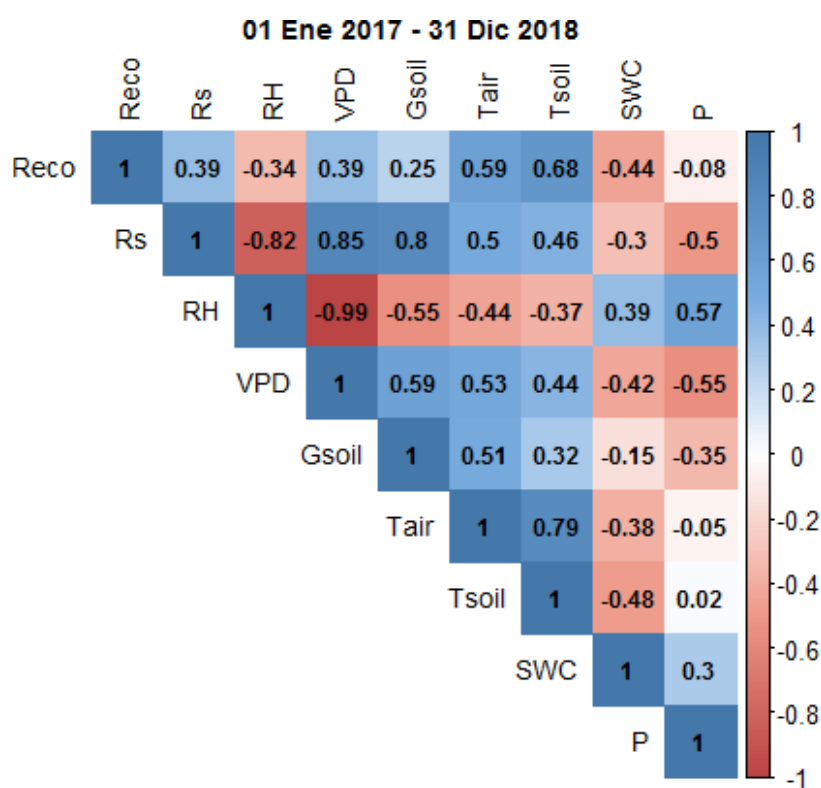


Figura 5. Correlograma de Spearman para Reco, Rs, RH, VPD, Gsoil, Tair, Tsoil, SWC y P con datos del período de estudio completo. Reco = Respiración ecosistémica, Rs = Radiación solar, RH = Humedad relativa, VPD = Déficit de presión de vapor, Gsoil = Calor del suelo, Tair = Temperatura del aire, Tsoil = Temperatura del suelo, SWC = Humedad del suelo, P = Precipitación.

Fuente: Autora, 2020.

Se determinó el valor de los percentiles P_{10} , P_{25} , P_{50} , P_{75} , y P_{90} de las variables a estudiar, para hacer un análisis de correlaciones basado en los mismos; de manera que se obtuvieron resultados que permiten mostrar cuáles son las variables más influyentes sobre el proceso de respiración a medida que este cambia de valor. La Tabla 3 muestra los valores mínimo y máximo, así como los percentiles de las variables de interés.

Tabla 3. Percentiles P_{10} , P_{25} , P_{50} , P_{75} , y P_{90} , valores mínimos y máximos de Reco, Tair, Tsoil y SWC.

	P_{10}	P_{25}	P_{50}	P_{75}	P_{90}	Mínimo	Máximo
Reco ($\text{gC m}^{-2} \text{ día}^{-1}$)	2.45	2.88	3.23	3.58	4.09	1.59	7.47
Tair ($^{\circ}\text{C}$)	4.95	5.78	6.60	7.25	7.75	2.33	9.26
Tsoil ($^{\circ}\text{C}$)	8.89	9.96	11.18	12.30	13.18	6.41	14.59
SWC (cm^3/cm^3)	0.47	0.58	0.66	0.69	0.72	0.26	0.77

Fuente: Autora, 2020.

Al llevar a cabo el análisis de percentiles correspondientes a Reco, se determinó que cuando los valores de Reco son menores a P_{10} , la respiración no se encuentra relacionada de manera significativa con ninguna variable analizada. A medida que los valores de Reco incrementan, encontrándose estos por debajo de P_{25} , se encuentran las relaciones directas más altas de Reco con Tair y Tsoil, con coeficientes de correlación de 0.35 y 0.43 respectivamente. Con estos valores de respiración la relación con SWC es baja, con un coeficiente de 0.09; sin embargo, esta relación incrementa a -0.31 cuando los valores de Reco son superiores a P_{75} . Cuando los valores de Reco se encuentran por encima de P_{90} , Tair y Tsoil se relacionan inversamente con Reco, mostrando un coeficiente de correlación de Spearman de -0.38 y -0.05, mientras que SWC no presenta ninguna correlación con Reco.

Al desarrollar un análisis con mayor énfasis en Tsoil, se determinó que cuando estos valores son menores a P_{10} , Reco tiene una correlación directa con Tair y Tsoil de 0.2 y 0.44 respectivamente, y una correlación inversa con SWC de -0.16. Cuando los valores de Tsoil son menores a P_{25} , se encuentra el máximo coeficiente de correlación de Reco con Tair de 0.46, y también la máxima correlación de Reco con Tsoil de 0.7. Cuando los valores de Tsoil se encuentran entre P_{25} y P_{75} , las relaciones de Reco con las demás variables mantiene el comportamiento general, siendo esta directa con Tair y Tsoil, e inversa con SWC. Cuando Tsoil está por encima de P_{75} , las relaciones de Reco con Tair y Tsoil son de 0.17 y 0.28 respectivamente, pero, la relación de Reco con SWC es la máxima, con un coeficiente de -0.36. Cuando los valores de Tsoil están por encima de

P₉₀, la relación de Reco con SWC es significativa e inversa con un coeficiente de -0.34, y la relación de Reco con Tair y Tsoil se vuelve negativa en este caso con valores de -0.15 y -0.11 respectivamente.

La temperatura del aire es una variable muy comúnmente usada al analizar variables meteorológicas, sin embargo, al momento de establecer relaciones de las mismas con la respiración, la gran mayoría de estudios han hecho énfasis en la influencia de la temperatura y humedad del suelo sobre la respiración. Debido a que en esta investigación, se determinó también una fuerte relación de Reco con Tair con un valor de 0.59, con el objetivo de explorar y para estudios futuros, también se hizo un estudio detallado de esta variable. Los resultados mostraron que cuando los valores de la temperatura del aire son bajos, por debajo de P₁₀, esta se relaciona con Reco de manera directa con un valor de 0.4; Tsoil por su parte también tiene un alto coeficiente de correlación con Reco de 0.67; mientras que SWC se relaciona inversamente con Reco, mostrando un coeficiente de -0.33. Cuando los valores de Tair incrementan hasta valores por debajo de P₂₅, las relaciones de las variables Tair y Tsoil con Reco van incrementando también, con coeficientes de 0.56 y 0.74 respectivamente; mientras que la relación de Reco con SWC disminuye a -0.13. Cuando Tair muestra valores intermedios, entre P₂₅ y P₇₅, Reco mantiene relaciones directas con ambas temperaturas y una relación inversa con SWC. SWC y Reco muestran el mayor coeficiente de correlación cuando Tair tiene valores mayores a P₇₅, siendo esta de -0.43. Cuando los valores de Tair son los más altos, mayores a P₉₀, el coeficiente de correlación de Reco con Tair es de 0.13, con Tsoil de 0.31 y con SWC de -0.37.

Por otro lado, al analizar el SWC, en la mayoría de los casos presenta una relación inversa con Reco. Cuando los datos de SWC son menores a P₁₀, SWC tiene una relación inversa muy débil con Reco de -0.06, mientras que la relación de Reco con Tair y Tsoil es directa, con valores de 0.21 y 0.62 respectivamente. Cuando los valores de SWC son menores a P₂₅, la relación de Reco con Tsoil disminuye a 0.46. A medida que SWC sigue incrementando, la relación de Reco con Tair y Tsoil aumenta también hasta encontrar su máxima correlación de 0.67 y 0.7 cuando los valores de SWC se encuentran entre P₅₀ y P₇₅. La relación de Reco con SWC también incrementa hasta encontrar su máximo coeficiente de correlación negativo de -0.37 cuando los valores de SWC están entre P₂₅ y P₅₀. Cuando los valores de SWC son máximos, sobre P₉₀, las relaciones de Reco con Tair

y Tsoil disminuye a 0.2 y 0.32, y la relación de Reco con SWC se vuelve directa, con un coeficiente de 0.11.

Con el análisis realizado, se puede decir que Reco se ve tanto inhibida como potenciada por las diferentes variables de acuerdo a los valores que estas van tomando. De manera general, Reco responde en mayor medida a Tsoil y Tair cuando los valores de estas tres variables se encuentran debajo de P_{25} . Por otro lado, Reco generalmente se encuentra inhibida por SWC, sobre todo, cuando Reco, Tair y Tsoil presentan valores superiores a P_{75} . Existe un comportamiento diferente cuando se hace el análisis de percentiles de SWC, ya que, Reco se encuentra mayormente inhibida por SWC, y potenciada por Tair y Tsoil cuando los valores de SWC son intermedios, encontrándose entre P_{25} y P_{50} , y entre P_{50} y P_{75} respectivamente. Cuando los valores de Reco son extremos, menores a P_{10} , las relaciones de Reco con las demás variables son casi nulas; mientras que, cuando los valores de Reco son extremos, mayores a P_{90} , el comportamiento general cambia, ya que, Tair se relaciona con Reco de manera inversa, inhibiendo el proceso de respiración, mientras que Tsoil y SWC pierden relación con Reco.

La Figura 6 muestra los correlogramas de Spearman para las variables de estudio usando los valores de los percentiles P_{10} , P_{25} , P_{75} y P_{90} correspondientes a la respiración ecosistémica, indicando los resultados descritos. Todos los demás correlogramas resultantes de este análisis se encuentran en el Apéndice A. La Figura 7 por su parte, representa un gráfico resumen de los resultados correspondientes a esta sección.

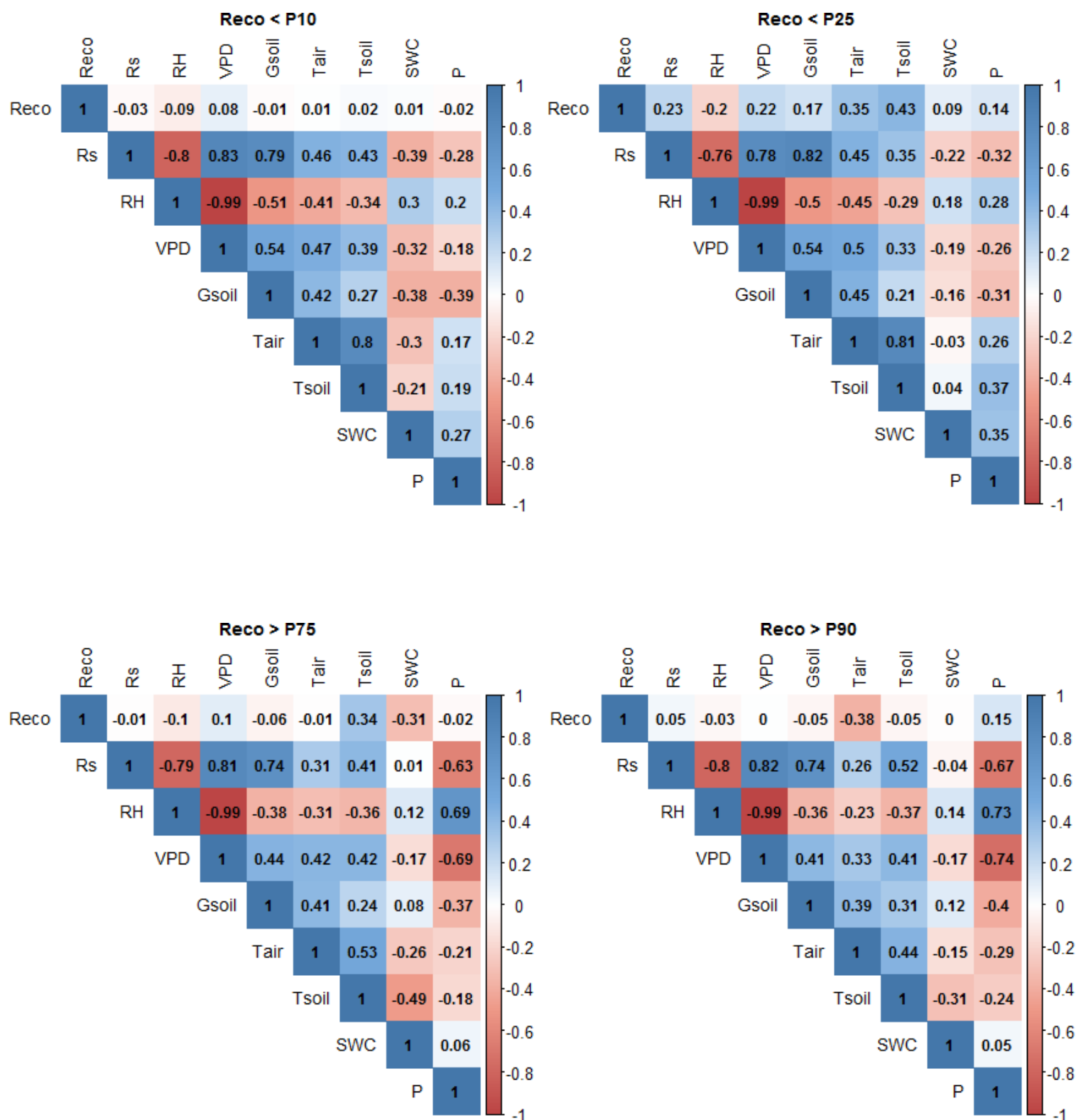


Figura 6. Correlogramas de Spearman para Reco < P₁₀, Reco < P₂₅, Reco > P₇₅ y Reco > P₉₀. Reco = Respiración ecosistémica.

Fuente: Autora, 2020.

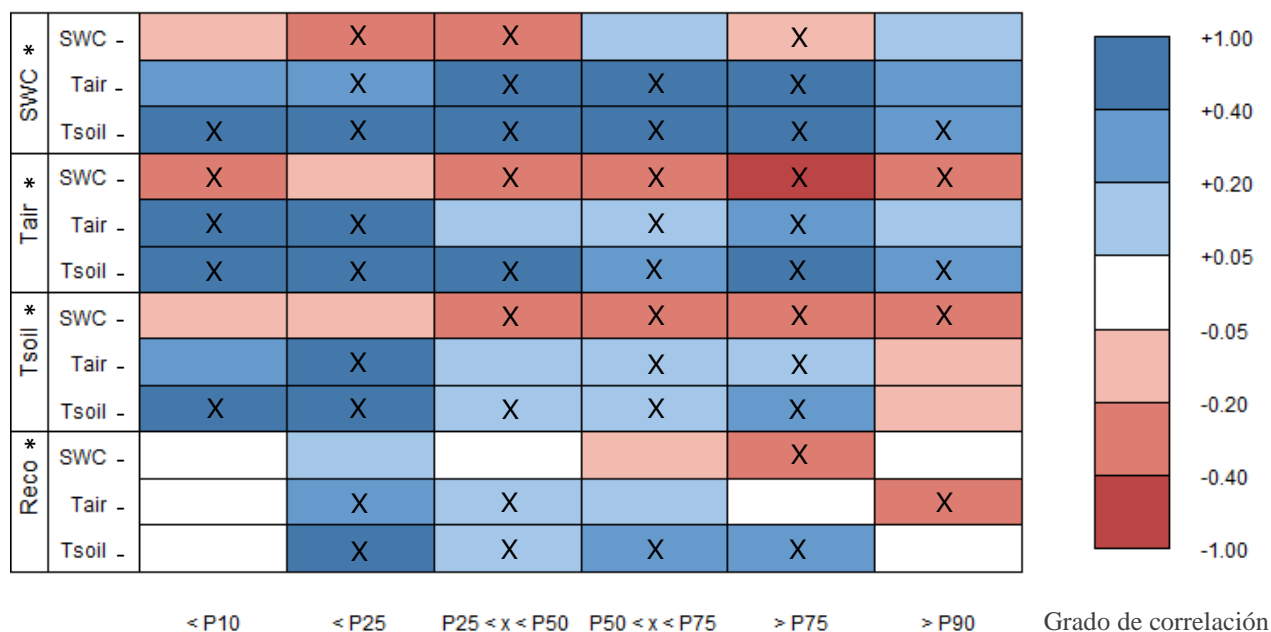


Figura 7. Correlaciones de Spearman entre Reco y las variables de estudio (SWC, Tair y Tsoil). Los cuadros marcados con una X denotan correlaciones significativas al 95 % de confianza. * Denota la categorización de acuerdo a los percentiles. - Denota la correlación con Reco.

Fuente: Autora, 2020.

4.2 Interpretación de la relación entre variables de interés y flujos de respiración

Se han realizado gráficas de líneas para dos meses particulares dentro del período de estudio: febrero 2017 y agosto 2017, representando un mes húmedo (Precipitación = 143.49 mm) y seco (Precipitación = 41.24 mm) respectivamente. La distinción entre mes húmedo y mes seco se realizó en base al registro de precipitaciones mensuales. Se seleccionaron febrero y agosto de 2017 como meses representativos de cada período para ilustrar el comportamiento de las variables.

Para ambos casos, se observa que Tair y Tsoil tienen un comportamiento muy similar, guardando entre ellas una relación directa. Lo mismo sucede entre estas variables y Reco; sin embargo, SWC se comporta de manera inversa. Al hacer una comparación entre los dos meses, se evidencia que los mayores valores, tanto de Reco, como de Tair, Tsoil y SWC ocurren en el mes de febrero, demostrándose que para estos meses en particular, se emite mayor cantidad de CO₂ en el mes húmedo estudiado, como se observa en la Figura 8.

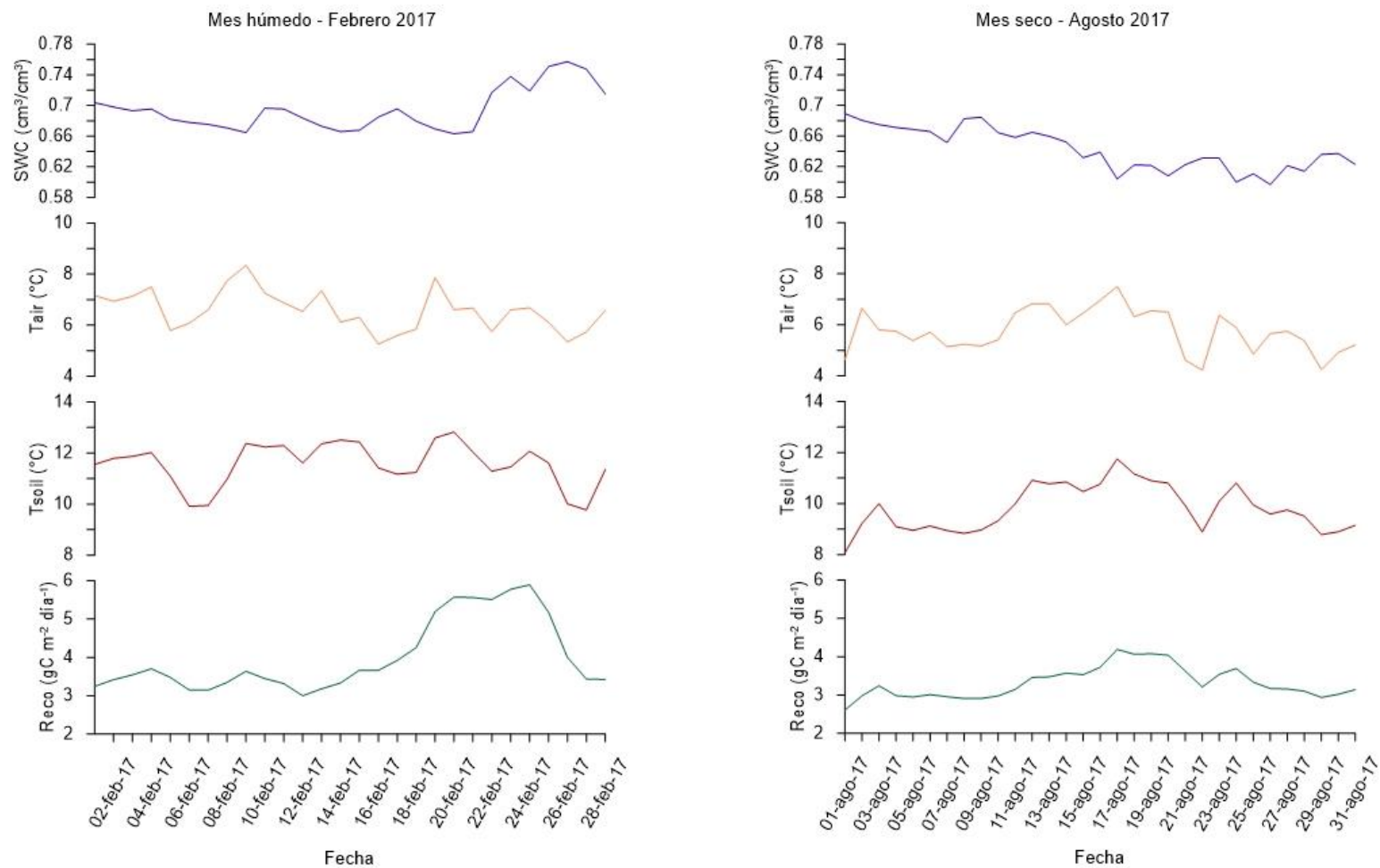


Figura 8. Evolución temporal diaria de SWC, Tair, Tsoil y Reco para febrero y agosto 2017.

Fuente: Autora, 2020.

En las siguientes gráficas, se han representado tres días completos (24 de febrero de 2017, 19 de agosto de 2017 y 07 de enero de 2018), los dos primeros corresponden a los días con los valores máximos de respiración dentro de los meses húmedo y seco analizados; mientras que el 07 de enero de 2018 corresponde al día de máxima respiración durante el período de estudio.

Haciendo una comparación de los días analizados, se observa que, el 24 de febrero de 2017 es el día con mayores valores de SWC, mientras que el 07 de enero de 2018 tiene los valores más bajos de humedad del suelo. Sin embargo, sucede lo contrario con Tsoil y Reco, ya que, estas variables tienen valores menores el 24 de febrero de 2017 en comparación al 07 de enero de 2018. El 19 de agosto de 2017 por su parte, tiene los valores más bajos de Reco entre los 3 días, y SWC se mantiene casi constante con un valor de aproximadamente 62 %. Tair actúa de manera bastante similar en los tres casos, sin embargo, presenta sus mínimos y máximos valores el 07 de enero de 2018 (Figura 9).

Es posible determinar que a nivel horario, Tsoil y Reco se comportan de manera casi exacta, con valores menores durante las primeras horas del día y con sus valores máximos alrededor de las 17:00. En cuanto a la temperatura del aire, esta presenta un comportamiento más variable, sin embargo, en todos los casos analizados, el valor máximo de Tair sucede alrededor de las 12:00, lo cual muestra que el suelo se va calentando más lento y que Reco no se encuentra controlada instantáneamente por Tair. Por otro lado, SWC el 24 de febrero de 2017 muestra una disminución de sus valores hasta las 13:00, luego de lo cual empieza a aumentar; sin embargo, en los demás días, SWC actúa distinto a Tsoil y Reco, ya que los valores altos de SWC se dan en la mañana, y disminuyen cuando los valores de respiración incrementan. En el Apéndice B, se proveen los gráficos para observar este comportamiento detallado de las variables de estudio.

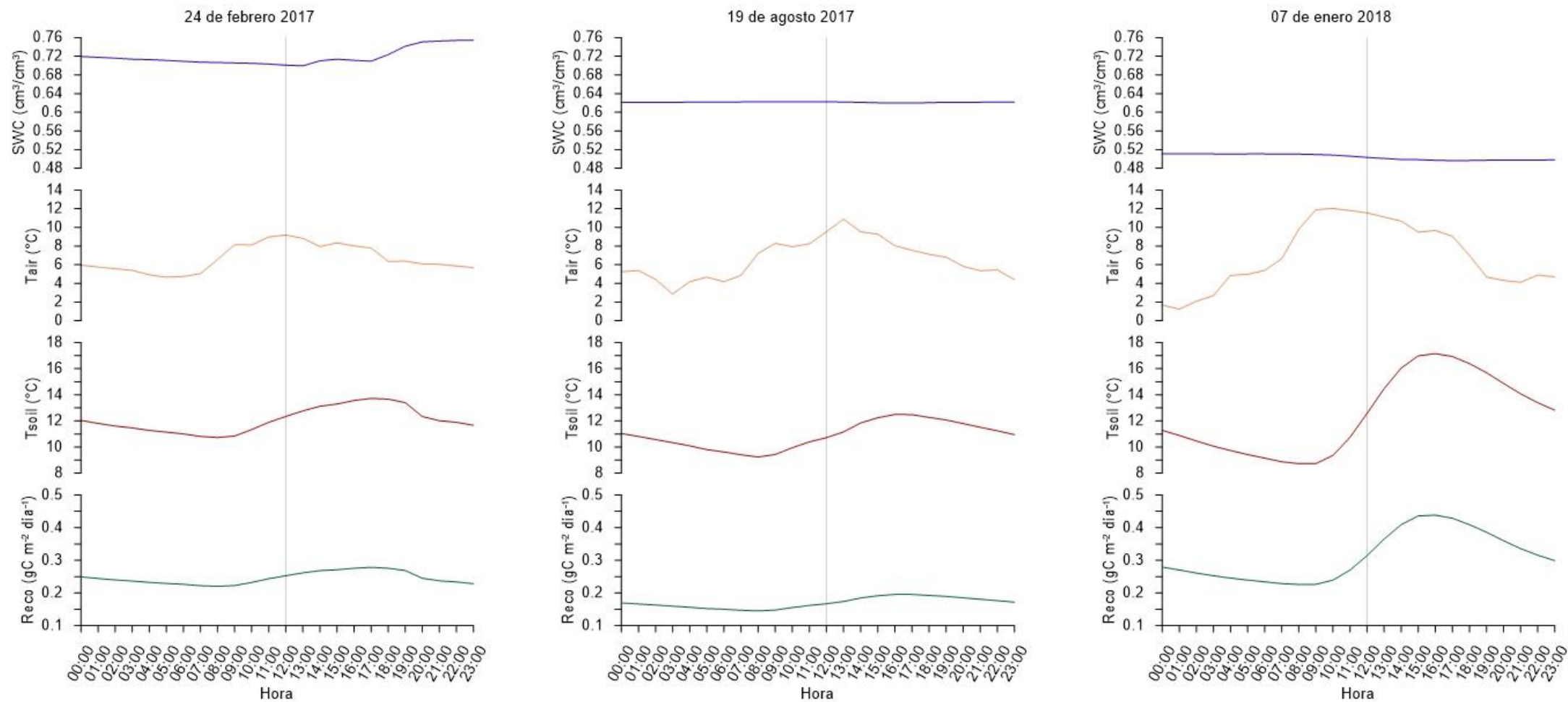


Figura 9. Evolución temporal horaria de SWC, Tair, Tsoil y Reco para tres días de alta Reco.

Fuente: Autora, 2020.

4.3 Análisis de correlogramas cruzados

La correlación cruzada es una medida de la relación entre dos señales, tanto en tiempo simultáneo como desfasadas en el tiempo. Esta correlación varía de -1 a +1 para indicar máxima correlación negativa o positiva respectivamente. Los gráficos resultantes de este análisis representan en el eje x el desfase temporal/retardo/lag; mientras que en el eje y se muestra la escala de los coeficientes de correlación cruzada, el cual se considera estadísticamente significativo si sobrepasa los límites del 95 % de confianza, representados por las líneas horizontales punteadas en los gráficos (Guevara-Díaz, 2014).

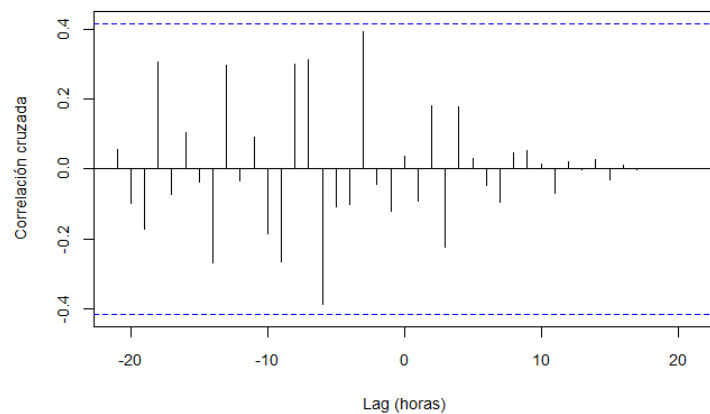
Se realizó un análisis de correlaciones cruzadas entre las variables de clima estudiadas (Tair y SWC) con la respiración ecosistémica, para encontrar si alguna de ellas es precursora o conduce al aumento o disminución de Reco. En esta sección no se hizo un análisis de Tsoil vs Reco, debido a que estas variables son interdependientes, ya que Reco emplea Tsoil para estimarse. En primera instancia, se analizaron dos días particulares representando un mes húmedo y un mes seco (24 de febrero 2017 y 19 de agosto 2017 respectivamente); luego, se tomó el día de mayor respiración en el período de estudio para hacer un análisis horario y determinar si los desfases se dan dentro de un rango de 24 horas.

Por otro lado, hay que destacar que la estacionariedad de las series es un requisito para el uso correcto de esta técnica para asegurar la independencia de los datos y evitar correlaciones espurias, por lo que las series originales fueron transformadas para cumplir con tal requerimiento. El análisis de correlaciones cruzadas con las series de datos originales se muestra en el Apéndice C, indicando que las correlaciones significativas existentes pueden ser esencialmente causadas por la tendencia, los ciclos de las variables, así como por autocorrelación en las series.

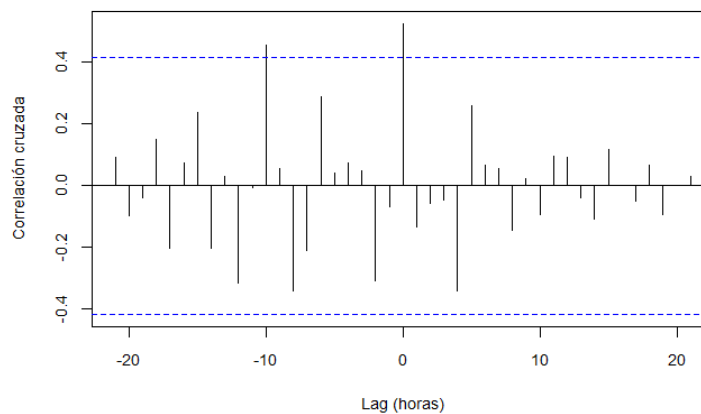
Las correlaciones que se encontraron significativas en el análisis, al superar el valor de 0.40 fueron pocas. El 19 de agosto de 2017 se encontró una correlación entre SWC y Reco en el lag 0 y en el lag -10 con coeficientes de 0.53 y 0.46 respectivamente; y una correlación entre Tair y Reco en el lag -2 con un coeficiente de 0.46 y en el lag -8 con un coeficiente de -0.43. Por otro lado, el 07 de enero 2018 existió correlación significativa entre SWC y Reco en el lag -3 con un coeficiente de -0.44, y entre Tair y Reco en el lag 0 con el mismo valor (Figura 10).



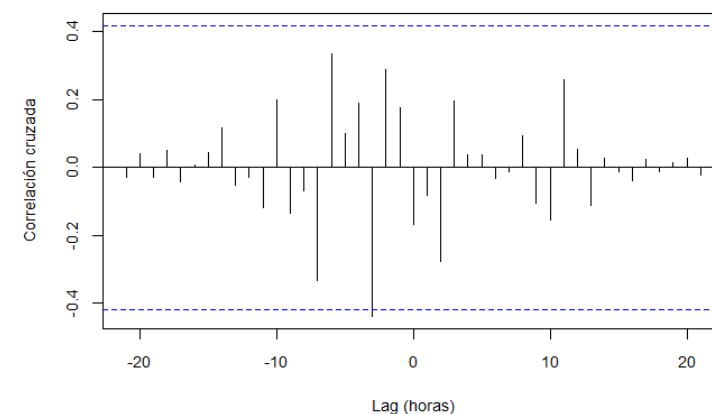
SWC - Reco (24 de febrero 2017)



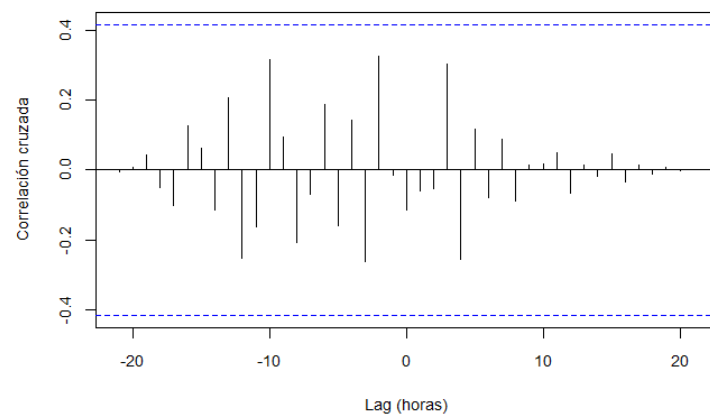
SWC - Reco (19 de agosto 2017)



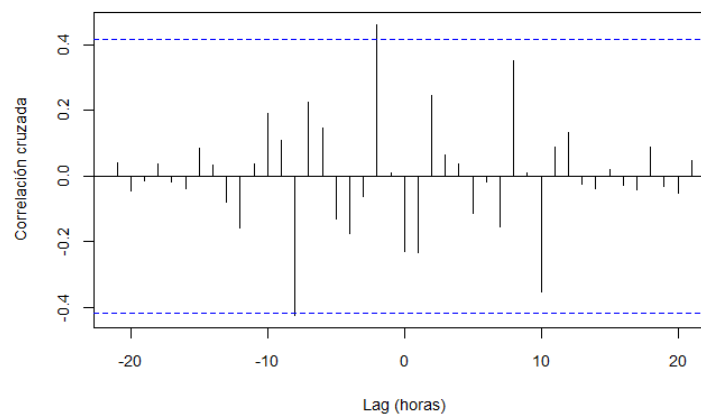
SWC - Reco (07 de enero 2018)



Tair - Reco (24 de febrero 2017)



Tair - Reco (19 de agosto 2017)



Tair - Reco (07 de enero 2018)

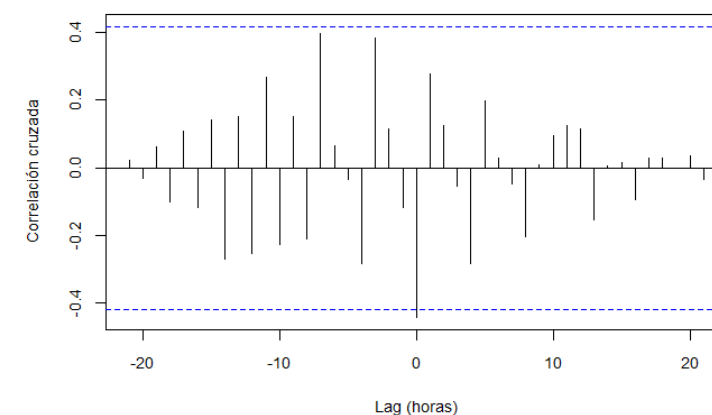


Figura 10. Correlaciones cruzadas entre Reco con SWC y Tair en días de alta Reco. Lags positivos significan que las variables lideran el proceso de Reco, y lags negativos significan que Reco lidera las demás variables.

Fuente: Autora, 2020.

5 DISCUSIÓN

Algunos estudios muestran que los mayores valores de respiración se obtienen cuando las condiciones de humedad y temperatura no son extremas, de manera que se tienen condiciones óptimas para llevar a cabo este proceso, encontrándose así T_{soil} por debajo de los 25 °C, y SWC entre 17 a 55 % (Carey et al., 2016; McKnight et al., 2017). En el presente estudio, los umbrales de las variables en los cuales la respiración se encuentra potenciada son diferentes a la literatura revisada; esto puede deberse a las particulares características del páramo. Tomando en consideración todo el período de estudio, la temperatura del aire en este ecosistema varía en un rango de 2.33 °C y 9.26 °C, la temperatura del suelo tiene una amplitud de hasta 8.2 °C, variando entre 6.41 °C a 14.59 °C y la humedad del suelo se mantiene mayoritariamente alta debido a la capacidad de los suelos de almacenar agua (González-Martínez et al., 2019; Podwojewski et al., 2006), variando entre 0.26 cm³/cm³ y 0.77 cm³/cm³. Debido a que, como se indica, los valores de temperatura del aire y suelo son menores y los valores de humedad del suelo son mayores en comparación a otros ecosistemas (Barros-López & Troncoso-Salgado, 2010; PUCE, 2020), Reco responde en mayor medida a T_{air} y T_{soil} cuando los valores de estas variables se encuentran bajo P_{25} (< 5.78 °C y < 9.96 °C respectivamente); mientras que SWC mayoritariamente inhibe la respiración, sin embargo, potencia este proceso cuando sus valores se encuentran sobre P_{90} (> 0.72 cm³/cm³).

Los resultados del estudio establecen que de manera general, la respiración se potencia por T_{air} y T_{soil} , y por el contrario, SWC inhibe su proceso al relacionarse inversamente con Reco; lo cual concuerda con resultados de otros estudios (Lafleur et al., 2005; T. Zhang et al., 2017). El proceso de respiración muestra sensibilidad frente a las variables estudiadas, sin embargo, estas también actúan conjuntamente (Jia et al., 2020; Jung et al., 2019; Matteucci et al., 2015), por lo que se determinó también que la respiración muestra relaciones más altas con SWC, cuando los valores de T_{air} y T_{soil} se encuentran sobre el valor de P_{50} (6.60 °C y 11.18 °C respectivamente), porque en otros casos la relación de Reco con SWC es más débil. De igual manera, la respiración presenta sensibilidad a T_{air} y T_{soil} sobre todo cuando los valores de SWC se encuentran entre el P_{25} y P_{75} (0.58 cm³/cm³ y 0.69 cm³/cm³). Debido a las condiciones biofísicas y climáticas específicas del páramo que ya se mencionaron, estos valores también son diferentes a aquellos resaltados por Luo & Zhou (2006d), siendo más bajos los rangos de temperaturas, y más altos

aquellos valores para SWC. Estos resultados se pueden evidenciar y son parte clave de la Figura 7.

Al analizar las correlaciones encontradas, es posible observar que Tair y Tsoil tienen un comportamiento y una influencia muy similar sobre Reco, por lo que se intuye que ciertas correlaciones que existen de las variables estudiadas con la respiración pueden deberse a las relaciones que existen entre las variables mismas, por lo que no necesariamente significa que Tair, Tsoil y SWC influyan de manera independiente sobre Reco, sino que su influencia es combinada. De esta manera, parte de la variabilidad de la respiración posiblemente pueda ser explicada exclusivamente por otras variables que no han sido estudiadas detalladamente en esta investigación, como el déficit de presión de vapor, calor del suelo, entre otros.

Los resultados de la sección 4.2 (Interpretación de la relación entre variables de interés y flujos de respiración) fortalecen la relación de Tsoil y Reco; y muestran además que estas están inversamente correlacionadas con SWC la mayor parte del tiempo.

Por otra parte, con el análisis de correlaciones cruzadas no se encontraron muchas correlaciones significativas entre las variables, lo cual probablemente se deba a que el proceso de respiración responda de manera instantánea e inmediata a los factores que le afectan, encontrándose quizás resultados diferentes al llevar a cabo un análisis subhorario (X. Tang et al., 2020; Q. Zhang et al., 2015).

6 CONCLUSIONES

Este estudio contribuye para el avance en el entendimiento de los factores que controlan la respiración ecosistémica en el páramo de Zhurucay. Para ello se usaron los datos de flujos de CO₂ (emisión de dióxido de carbono) agregados a nivel diario y horario, así como datos de variables biofísicas y climáticas obtenidos del sistema Covarianza de Remolinos. Los principales hallazgos constituyen:

- Se encontró que las variables se encuentran correlacionadas entre sí, influenciando prioritariamente sobre la respiración: la temperatura del aire y del suelo, y la humedad del suelo. De manera contraria; la radiación solar, humedad relativa, déficit de presión de vapor, calor del suelo y precipitación, tuvieron un menor coeficiente de correlación con la respiración ecosistémica. La pregunta de investigación de este trabajo fue *¿Cuáles son las variables biofísicas y climáticas*

que controlan la emisión de CO₂ y están asociadas a eventos extremos de tal flujo hacia la atmósfera en el ecosistema de páramo de Zhurucay?, por tanto, ahora se puede responder con mucha certeza que cuando existen eventos extremos de emisión de dióxido de carbono, es decir, aquellos eventos cuyos valores de respiración se encuentran sobre P₉₀, se evidencia que Tair influye de manera inversa sobre Reco de modo significativo; mientras que Tsoil y SWC por su parte, carecen de relación significativa con este proceso.

- Los datos de respiración ecosistémica del sitio de estudio demuestran que el páramo ecuatoriano en Zhurucay emite mayor cantidad de CO₂ hacia la atmósfera (1195 gC m⁻² año⁻¹) en comparación con otros ecosistemas como praderas (543 - 673 gC m⁻² año⁻¹) y pastizales (221 - 376 gC m⁻² año⁻¹); sin embargo, los valores de respiración anuales del sitio de estudio son comparables con aquellos emitidos en ecosistemas forestales/de bosque (550 - 1291 gC m⁻² año⁻¹) (Jia et al., 2020), así como también con los valores de respiración obtenidos en el mismo ecosistema de páramo (1235 – 1303 gC m⁻² año⁻¹) durante el período marzo 2016 – febrero 2018 (Carrillo-Rojas et al., 2019).
- Se encontró que tanto a nivel diario como horario, la respiración responde de manera inmediata a Tsoil; al comparar los meses de febrero y agosto de 2017, se observó que los mayores valores de Reco corresponden al mes húmedo (febrero). De los tres días analizados en el presente estudio, el 07 de enero de 2018 presenta los mayores valores de temperaturas y los valores más bajos de SWC; este día presentó la mayor emisión de CO₂; condición que se puede deber a que el suelo se encuentra más poroso y facilita el proceso de Reco.
- Los resultados del análisis de correlaciones cruzadas conllevan a la generación de nuevas hipótesis para el aporte en la evaluación y desarrollo acerca de los factores que controlan el proceso de respiración.

7 INVESTIGACIONES FUTURAS

El estudio realizado contribuye a investigaciones futuras que abarquen mecanismos de respiración autótrofa y heterótrofa, enfocando esfuerzos en el estudio de procesos a nivel edafológico, microbiológico y fisicoquímico del suelo. El retorno de carbono desde la

superficie terrestre juega un rol importante en las concentraciones de CO₂ totales en la atmósfera, que por ser el más notorio gas de efecto invernadero, tiene una gran implicación en el calentamiento global y cambio climático.

En los años venideros, las investigaciones se centrarán en determinar la respuesta climática frente a procesos de respiración a nivel ecosistémico y global. Uno de los objetivos será integrar los factores que afectan y controlan este proceso dentro de modelos climáticos. Es importante que estos modelos incluyan también representaciones de la dinámica microbial, y para mejor entendimiento de este proceso, se deberá ahondar en el estudio de controladores edafológicos en la descomposición, interacciones entre carbono-nitrógeno, entre otros (Phillips & Nickerson, 2015).

Todavía queda mucho por investigar con respecto al tema de la respiración y más aún en ecosistemas de páramo. Sin embargo, se ha realizado un estudio en los Andes ecuatorianos aplicando modelos de superficie terrestre (LSM) para explorar el intercambio y estimación de flujos de energía (radiación neta, calor sensible, calor latente, calor del suelo) y evapotranspiración actual en este bioma. Existe mucha literatura con respecto a estos modelos, y los mismos han sido aplicados extensivamente alrededor del planeta, debido principalmente a su capacidad predictiva de flujos usando escenarios bióticos y abióticos; pero, hasta el desarrollo de este estudio no se conocía que sean usados en ecosistemas de páramo del Ecuador. Los resultados de la simulación de los flujos usando LSM demuestran subestimaciones y sobreestimaciones altas con respecto a observaciones micrometeorológicas y a flujos del sistema Covarianza de Remolinos, sin embargo, se menciona que estos modelos constituyen una herramienta poderosa para la predicción y estimación de flujos del ecosistema.

Para ello, es necesario que se reduzca la escala de estos modelos globales, y sean ajustados para las características particulares del ecosistema de interés, así como también resulta imprescindible el estudio de las características fisio-morfológicas de la vegetación, requisito crucial si se desea estimar flujos de carbono (intercambio ecosistémico neto, producción primaria y respiración) (Carrillo-Rojas et al., 2020). Estos modelos deben considerar tanto factores bióticos como abióticos en el mismo, ya que, se ha mostrado que las variables bióticas también tienen una fuerte influencia sobre el proceso de respiración; de esta manera se contribuirá a una mejora en las estimaciones (Han et al., 2007).

8 REFERENCIAS

- Acosta, M., Dušek, J., Chamizo, S., Serrano-Ortiz, P., & Pavelka, M. (2019). Autumnal fluxes of CH₄ and CO₂ from Mediterranean reed wetland based on eddy covariance and chamber methods. *CATENA*, 183, 104191. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104191>
- Arroyo, M. T. K., & Cavieres, L. A. (2013). High-Elevation Andean Ecosystems. En S. A. Levin (Ed.), *Encyclopedia of Biodiversity (Second Edition)* (pp. 96-110). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384719-5.00428-7>
- Aubinet, M., Vesala, T., & Papale, D. (Eds.). (2012). *Eddy covariance: A practical guide to measurement and data analysis*. Springer.
- Baldocchi, D., Falge, E., Gu, L., Olson, R., Hollinger, D., Running, S., Anthoni, P., Bernhofer, Ch., Davis, K., Evans, R., Fuentes, J., Goldstein, A., Katul, G., Law, B., Lee, X., Malhi, Y., Meyers, T., Munger, W., Oechel, W., ... Wofsy, S. (2001). FLUXNET: A New Tool to Study the Temporal and Spatial Variability of Ecosystem-Scale Carbon Dioxide, Water Vapor, and Energy Flux Densities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82(11), 2415-2434. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(2001\)082<2415:FANTTS>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(2001)082<2415:FANTTS>2.3.CO;2)
- Barros-López, J. G., & Troncoso-Salgado, A. Y. (2010). *ATLAS CLIMATOLÓGICO DEL ECUADOR*. 153.
- Black, T. A., Hartog, G. D., Neumann, H. H., Blanken, P. D., Yang, P. C., Russell, C., Nesic, Z., Lee, X., Chen, S. G., Staebler, R., & Novak, M. D. (1996). Annual cycles of water vapour and carbon dioxide fluxes in and above a boreal aspen forest. *Global Change Biology*, 2(3), 219-229. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.1996.tb00074.x>
- Burba, G. (2013). *Eddy covariance method for scientific, industrial, agricultural, and regulatory applications: A field book on measuring ecosystem gas exchange and areal emission rates*. LI-COR Biosciences.
- Burba, G., Madsen, R., & Feese, K. (2013). Eddy Covariance Method for CO₂ Emission Measurements in CCUS Applications: Principles, Instrumentation and Software. *Energy Procedia*, 40, 329-336. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.08.038>
- Camarda, M., Gurrieri, S., & Valenza, M. (2009). Effects of soil gas permeability and recirculation flux on soil CO₂ flux measurements performed using a closed

- dynamic accumulation chamber. *Chemical Geology*, 265(3), 387-393.
<https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2009.05.002>
- Carey, J. C., Tang, J., Templer, P. H., Kroeger, K. D., Crowther, T. W., Burton, A. J., Dukes, J. S., Emmett, B., Frey, S. D., Heskell, M. A., Jiang, L., Machmuller, M. B., Mohan, J., Panetta, A. M., Reich, P. B., Reinsch, S., Wang, X., Allison, S. D., Bamminger, C., ... Tietema, A. (2016). Temperature response of soil respiration largely unaltered with experimental warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(48), 13797-13802.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1605365113>
- Carrillo-Rojas, G., Schulz, H. M., Orellana-Alvear, J., Ochoa-Sánchez, A., Trachte, K., Célleri, R., & Bendix, J. (2020). Atmosphere-surface fluxes modeling for the high Andes: The case of páramo catchments of Ecuador. *Science of The Total Environment*, 704, 135372. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135372>
- Carrillo-Rojas, G., Silva, B., Rollenbeck, R., Célleri, R., & Bendix, J. (2019). The breathing of the Andean highlands: Net ecosystem exchange and evapotranspiration over the páramo of southern Ecuador. *Agricultural and Forest Meteorology*, 265, 30-47. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.11.006>
- Castañeda-Martín, A. E., & Montes-Pulido, C. R. (2017). Carbon stock in andean paramo. *Entramado*, 13(1), 210-221.
<https://doi.org/10.18041/entramado.2017v13n1.25112>
- Célleri, R., & Feyen, J. (2009). The Hydrology of Tropical Andean Ecosystems: Importance, Knowledge Status, and Perspectives. *Mountain Research and Development*, 350-355. <https://doi.org/10.1659/mrd.00007>
- Chan, E. Y. (2018). Climate change is the world's greatest threat – In Celsius or Fahrenheit? *Journal of Environmental Psychology*, 60, 21-26.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2018.09.002>
- Chapin, F. S., Woodwell, G. M., Randerson, J. T., Rastetter, E. B., Lovett, G. M., Baldocchi, D. D., Clark, D. A., Harmon, M. E., Schimel, D. S., Valentini, R., Wirth, C., Aber, J. D., Cole, J. J., Goulden, M. L., Harden, J. W., Heimann, M., Howarth, R. W., Matson, P. A., McGuire, A. D., ... Schulze, E.-D. (2006). Reconciling Carbon-cycle Concepts, Terminology, and Methods. *Ecosystems*, 9(7), 1041-1050. <https://doi.org/10.1007/s10021-005-0105-7>
- Curiel Yuste, J., Hereş, A.-M., Ojeda, G., Paz, A., Pizano, C., García-Angulo, D., & Lasso, E. (2017). Soil heterotrophic CO₂ emissions from tropical high-elevation

- ecosystems (Páramos) and their sensitivity to temperature and moisture fluctuations. *Soil Biology and Biochemistry*, 110, 8-11. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.02.016>
- De Gregorio, S., Camarda, M., Cappuzzo, S., & Gurrieri, S. (2013). An innovative method for continuous measurement of soil CO₂ flux. *Chemical Geology*, 341, 102-109. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.01.011>
- Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales. (2015). *Observatorio Ecohidrológico Zhurucay*. <https://www.ucuenca.edu.ec/idrhica/index.php/es/laboratorios/observatorio-ecohidrologico-zhurucay/>
- Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales. (2018).
- Gessler, A., Roy, J., Kayler, Z., Ferrio, J. P., Alday, J. G., Bahn, M., del Castillo, J., Devidal, S., García-Muñoz, S., Landais, D., Martín-Gomez, P., Milcu, A., Piel, C., Pirhofer-Walzl, K., Galiano, L., Schaub, M., Haeni, M., Ravel, O., Salekin, S., ... Resco de Dios, V. (2017). Night and day – Circadian regulation of night-time dark respiration and light-enhanced dark respiration in plant leaves and canopies. *Environmental and Experimental Botany*, 137, 14-25. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.01.014>
- González-Martínez, M. D., Huguet, C., Pearse, J., McIntyre, N., & Camacho, L. A. (2019). Assessment of potential contamination of Paramo soil and downstream water supplies in a coal-mining region of Colombia. *Applied Geochemistry*, 108, 104382. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.104382>
- González-Ubierna, S., & Lai, R. (2019). Modelling the effects of climate factors on soil respiration across Mediterranean ecosystems. *Journal of Arid Environments*, 165, 46-54. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.02.008>
- Greco, S., & Baldocchi, D. D. (1996). Seasonal variations of CO₂ and water vapour exchange rates over a temperate deciduous forest. *Global Change Biology*, 2(3), 183-197. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.1996.tb00071.x>
- Guevara-Díaz, J. M. (2014). Uso correcto de la correlación cruzada en Climatología: El caso de la presión atmosférica entre Taití y Darwin. *Terra*, 30(47), 79-102.
- Han, G., Zhou, G., Xu, Z., Yang, Y., Liu, J., & Shi, K. (2007). Biotic and abiotic factors controlling the spatial and temporal variation of soil respiration in an agricultural ecosystem. *Soil Biology and Biochemistry*, 39(2), 418-425. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.08.009>

- Hiller, R., Zeeman, M. J., & Eugster, W. (2008). Eddy-Covariance Flux Measurements in the Complex Terrain of an Alpine Valley in Switzerland. *Boundary-Layer Meteorology*, 127(3), 449-467. <https://doi.org/10.1007/s10546-008-9267-0>
- Hofstede, R., (1999). *El páramo como espacio para la fijación de carbono atmosférico*. En: Medina, G., Mena, P. (Eds.), *El páramo como espacio de mitigación de carbono atmosférico*. Serie Páramo, N°1 (pp. 1-57). GTP/Abya-Yala. Quito.
- Hofstede, R. G. M., & Llambí, L. D. (2019). Plant Diversity in Páramo—Neotropical High Mountain Humid Grasslands. En *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11858-5>
- Horsburgh, J. S., Tarboton, D. G., Maidment, D. R., & Zaslavsky, I. (2011). Components of an environmental observatory information system. *Computers & Geosciences*, 37(2), 207-218. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2010.07.003>
- Jeong, S.-H., Eom, J.-Y., Lee, J., & Lee, J.-S. (2017). Effect of rainfall events on soil carbon flux in mountain pastures. *Journal of Ecology and Environment*, 41(1), 37. <https://doi.org/10.1186/s41610-017-0056-x>
- Jia, X., Mu, Y., Zha, T., Wang, B., Qin, S., & Tian, Y. (2020). Seasonal and interannual variations in ecosystem respiration in relation to temperature, moisture, and productivity in a temperate semi-arid shrubland. *Science of The Total Environment*, 709, 136210. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136210>
- Jung, C. G., Xu, X., Niu, S., Liang, J., Chen, X., Shi, Z., Jiang, L., & Luo, Y. (2019). Experimental warming amplified opposite impacts of drought vs. Wet extremes on ecosystem carbon cycle in a tallgrass prairie. *Agricultural and Forest Meteorology*, 276-277, 107635. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107635>
- Lafleur, P. M., Moore, T. R., Roulet, N. T., & Frolking, S. (2005). Ecosystem Respiration in a Cool Temperate Bog Depends on Peat Temperature But Not Water Table. *Ecosystems*, 8(6), 619-629. <https://doi.org/10.1007/s10021-003-0131-2>
- Lajtha, K., Bowden, R. D., Crow, S., Fekete, I., Kotroczo, Z., Plante, A., Simpson, M. J., & Nadelhoffer, K. J. (2018). The detrital input and removal treatment (DIRT) network: Insights into soil carbon stabilization. *Science of The Total Environment*, 640-641, 1112-1120. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.388>
- Lellei-Kovács, E., Kovács-Láng, E., Botta-Dukát, Z., Kalapos, T., Emmett, B., & Beier, C. (2011). Thresholds and interactive effects of soil moisture on the temperature

- response of soil respiration. *European Journal of Soil Biology*, 47(4), 247-255.
<https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2011.05.004>
- Lloyd, J., & Taylor, J. A. (1994). On the Temperature Dependence of Soil Respiration. *Functional Ecology*, 8(3), 315-323. JSTOR. <https://doi.org/10.2307/2389824>
- Luo, Y., & Zhou, X. (2006a). CHAPTER 1—Introduction and Overview. En Y. Luo & X. Zhou (Eds.), *Soil Respiration and the Environment* (pp. 3-15). Academic Press.
<https://doi.org/10.1016/B978-012088782-8/50001-2>
- Luo, Y., & Zhou, X. (2006b). CHAPTER 2—Importance and Roles of Soil Respiration. En Y. Luo & X. Zhou (Eds.), *Soil Respiration and the Environment* (pp. 17-32). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012088782-8/50002-4>
- Luo, Y., & Zhou, X. (2006c). CHAPTER 3—Processes of CO₂ Production in Soil. En Y. Luo & X. Zhou (Eds.), *Soil Respiration and the Environment* (pp. 35-59). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012088782-8/50003-6>
- Luo, Y., & Zhou, X. (2006d). CHAPTER 5—Controlling Factors. En Y. Luo & X. Zhou (Eds.), *Soil Respiration and the Environment* (pp. 79-105). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012088782-8/50005-X>
- Luo, Y., & Zhou, X. (2006e). CHAPTER 7—Responses to Disturbances. En Y. Luo & X. Zhou (Eds.), *Soil Respiration and the Environment* (pp. 133-158). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012088782-8/50007-3>
- Matteucci, M., Gruening, C., Goded Ballarin, I., Seufert, G., & Cescatti, A. (2015). Components, drivers and temporal dynamics of ecosystem respiration in a Mediterranean pine forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 88, 224-235.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.05.017>
- McKnight, J. Y., Harden, C. P., & Schaeffer, S. M. (2017). Soil CO₂ flux trends with differences in soil moisture among four types of land use in an Ecuadorian páramo landscape. *Physical Geography*, 38(1), 51-61.
<https://doi.org/10.1080/02723646.2016.1256101>
- Minaya, V., Corzo, G. A., Solomatine, D. P., & Mynett, A. E. (2018). Data-driven techniques for modelling the gross primary production of the páramo vegetation using climate data: Application in the Ecuadorian Andean region. *Ecological Informatics*, 43, 222-230. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2016.12.002>
- Mosquera, G. M., Lazo, P. X., Céleri, R., Wilcox, B. P., & Crespo, P. (2015). Runoff from tropical alpine grasslands increases with areal extent of wetlands. *CATENA*, 125, 120-128. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.10.010>

- Munoz, M. A., Faz, A., & Mermut, A. R. (2015). Soil Carbon Reservoirs at High-Altitude Ecosystems in the Andean Plateau. En M. Öztürk, K. R. Hakeem, I. Faridah-Hanum, & R. Efe (Eds.), *Climate Change Impacts on High-Altitude Ecosystems* (pp. 135-153). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-12859-7_4
- Ogle, K. (2018). Hyperactive soil microbes might weaken the terrestrial carbon sink. *Nature*, 560(7716), 32-33. <https://doi.org/10.1038/d41586-018-05842-2>
- Padrón, R. S. (2013). *Análisis de la estructura de la lluvia del Páramo*. 100.
- Padrón, R. S., Wilcox, B. P., Crespo, P., & Célleri, R. (2015). Rainfall in the Andean Páramo: New Insights from High-Resolution Monitoring in Southern Ecuador. *Journal of Hydrometeorology*, 16(3), 985-996. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0135.1>
- Phillips, C. L., & Nickerson, N. (2015). Soil Respiration. En *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.09442-2>
- Podwojewski, P., Poulenard, J., Zambrana, T., & Hofstede, R. (2006). Overgrazing effects on vegetation cover and properties of volcanic ash soil in the páramo of Llangahua and La Esperanza (Tungurahua, Ecuador). *Soil Use and Management*, 18(1), 45-55. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2002.tb00049.x>
- Poulenard, J., Podwojewski, P., & Herbillon, A. J. (2003). Characteristics of non-allophanic Andisols with hydric properties from the Ecuadorian páramos. *Geoderma*, 117(3-4), 267-281. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00128-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00128-9)
- PUCE. (2020). *Regiones Naturales Ecuador*. <https://bioweb.bio/faunaweb/amphibiaweb/RegionesNaturales>
- Reichstein, M., Falge, E., Baldocchi, D., Papale, D., Aubinet, M., Berbigier, P., Bernhofer, C., Buchmann, N., Gilmanov, T., Granier, A., Grunwald, T., Havrankova, K., Ilvesniemi, H., Janous, D., Knohl, A., Laurila, T., Lohila, A., Loustau, D., Matteucci, G., ... Valentini, R. (2005). On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: Review and improved algorithm. *Global Change Biology*, 11(9), 1424-1439. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001002.x>
- Sánchez, M. E., Chimner, R. A., Hribljan, J. A., Lilleskov, E. A., & Suárez, E. (2017). Carbon dioxide and methane fluxes in grazed and undisturbed mountain peatlands

- in the Ecuadorian Andes. *Mires and Peat*, 19, 1–18.
<https://doi.org/10.19189/MaP.2017.OMB.277>
- Schipper, L. A., Petrie, O. J., O'Neill, T. A., Mudge, P. L., Liáng, L. L., Robinson, J. M., & Arcus, V. L. (2019). Shifts in temperature response of soil respiration between adjacent irrigated and non-irrigated grazed pastures. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 285, 106620. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106620>
- Secretaría General de la Comunidad Andina. (2009). *Atlas de los Andes del Norte y Centro* [Text]. SINIA | Sistema Nacional de Información Ambiental. <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/atlas-andes-norte-centro>
- Serrano-Ortiz, P., Domingo, F., Cazorla, A., Were, A., Cuezva, S., Villagarcía, L., Alados-Arboledas, L., & Kowalski, A. S. (2009). Interannual CO₂ exchange of a sparse Mediterranean shrubland on a carbonaceous substrate. *Journal of Geophysical Research*, 114(G4), G04015. <https://doi.org/10.1029/2009JG000983>
- Sun, J., Zhou, G., & Han, G. (2010). Effects of solar radiation on soil respiration of a maize ecosystem. *Shengtai Xuebao/ Acta Ecologica Sinica*, 30, 5925-5932.
- Tang, J., Bradford, M. A., Carey, J., Crowther, T. W., Machmuller, M. B., Mohan, J. E., & Todd-Brown, K. (2019). Chapter 8—Temperature sensitivity of soil carbon. En J. E. Mohan (Ed.), *Ecosystem Consequences of Soil Warming* (pp. 175-208). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813493-1.00009-0>
- Tang, X., Pei, X., Lei, N., Luo, X., Liu, L., Shi, L., Chen, G., & Liang, J. (2020). Global patterns of soil autotrophic respiration and its relation to climate, soil and vegetation characteristics. *Geoderma*, 369, 114339. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114339>
- Valentini, R., Angelis, P. D., Matteucci, G., Monaco, R., Dore, S., & Mucnozza, G. E. S. (1996). Seasonal net carbon dioxide exchange of a beech forest with the atmosphere. *Global Change Biology*, 2(3), 199-207. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.1996.tb00072.x>
- Vásconez, P. M., & Hofstede, R. (2006). *Los Páramos Ecuatorianos*. 19.
- Wutzler, T., Lucas-Moffat, A., Migliavacca, M., Knauer, J., Sickel, K., Šigut, L., Menzer, O., & Reichstein, M. (2018). Basic and extensible post-processing of eddy covariance flux data with REddyProc. *Biogeosciences*, 15(16), 5015-5030. <https://doi.org/10.5194/bg-15-5015-2018>

- Xu, M., & Shang, H. (2016). Contribution of soil respiration to the global carbon equation. *Journal of Plant Physiology*, 203, 16-28. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.08.007>
- Xu, Z., Tang, S., Xiong, L., Yang, W., Yin, H., Tu, L., Wu, F., Chen, L., & Tan, B. (2015). Temperature sensitivity of soil respiration in China's forest ecosystems: Patterns and controls. *Applied Soil Ecology*, 93, 105-110. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.04.008>
- Yamamoto, S., Murayama, S., Saigusa, N., & Kondo, H. (1999). Seasonal and inter-annual variation of CO₂ flux between a temperate forest and the atmosphere in Japan. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 51(2), 402-413. <https://doi.org/10.3402/tellusb.v51i2.16314>
- Yu, L., Wang, Y., Wang, Y., Sun, S., & Liu, L. (2015). Quantifying Components of Soil Respiration and Their Response to Abiotic Factors in Two Typical Subtropical Forest Stands, Southwest China. *PLoS ONE*, 10(2). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0117490>
- Zhang, Q., Katul, G. G., Oren, R., Daly, E., Manzoni, S., & Yang, D. (2015). The hysteresis response of soil CO₂ concentration and soil respiration to soil temperature. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 120(8), 1605-1618. <https://doi.org/10.1002/2015JG003047>
- Zhang, T., Wang, G., Yang, Y., Mao, T., & Chen, X. (2017). Grassland types and season-dependent response of ecosystem respiration to experimental warming in a permafrost region in the Tibetan Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 247, 271-279. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.08.010>

9 ANEXOS

Apéndice A. Correlogramas de Spearman

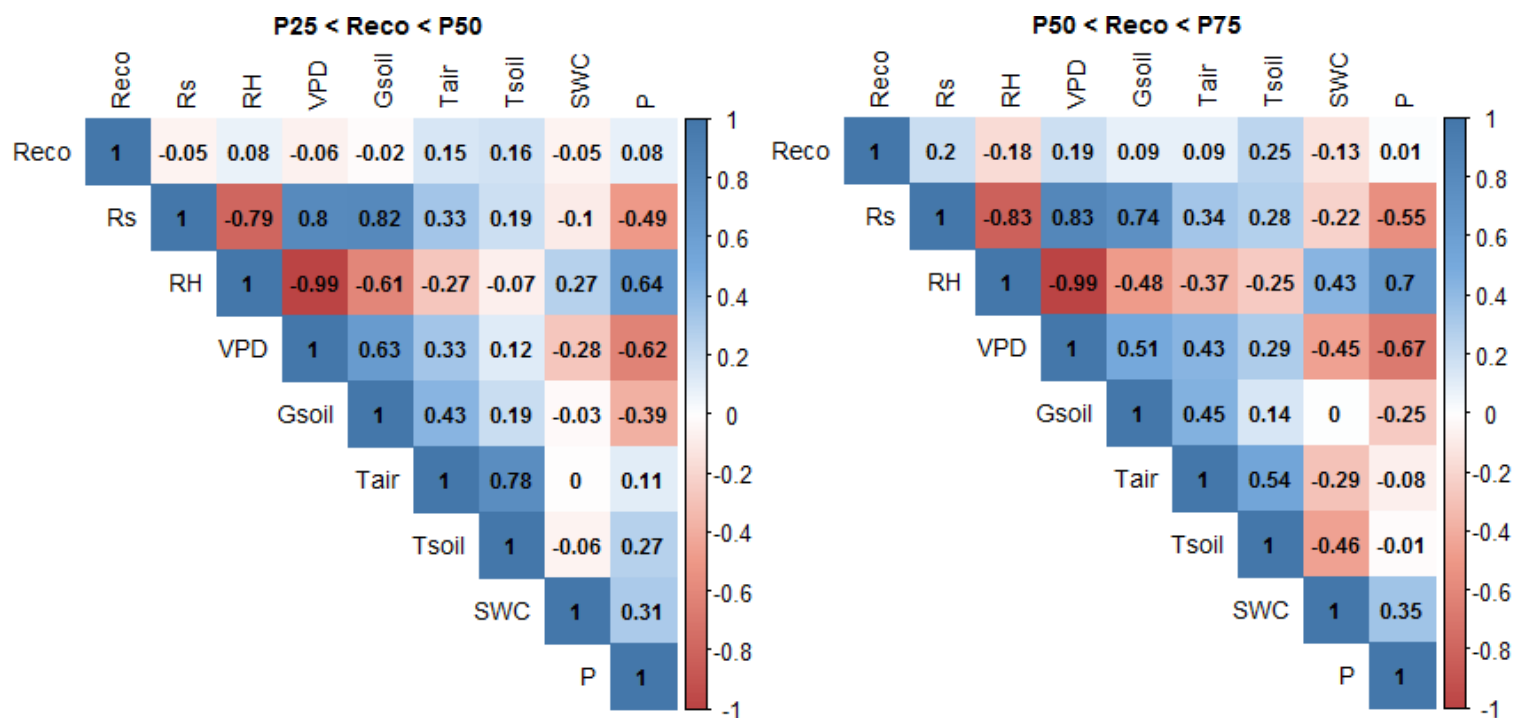
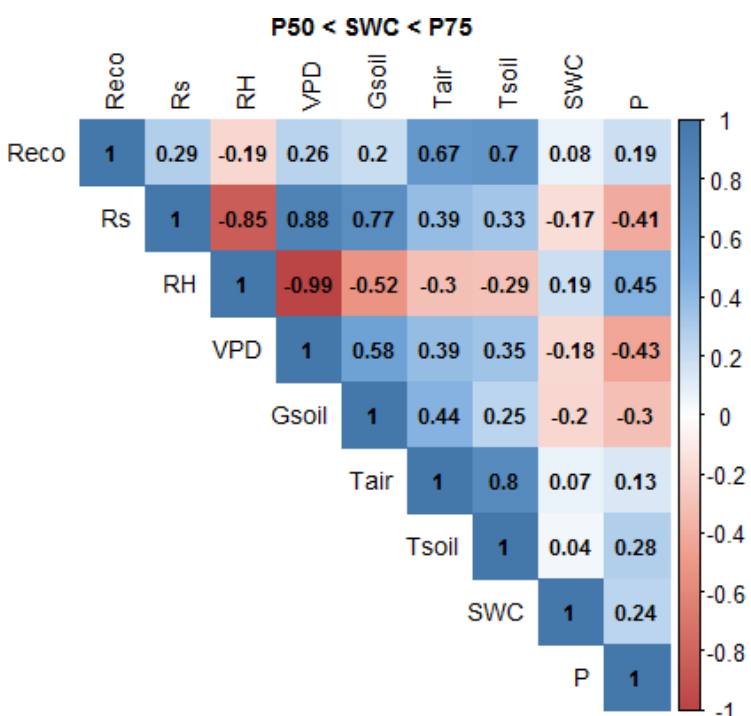
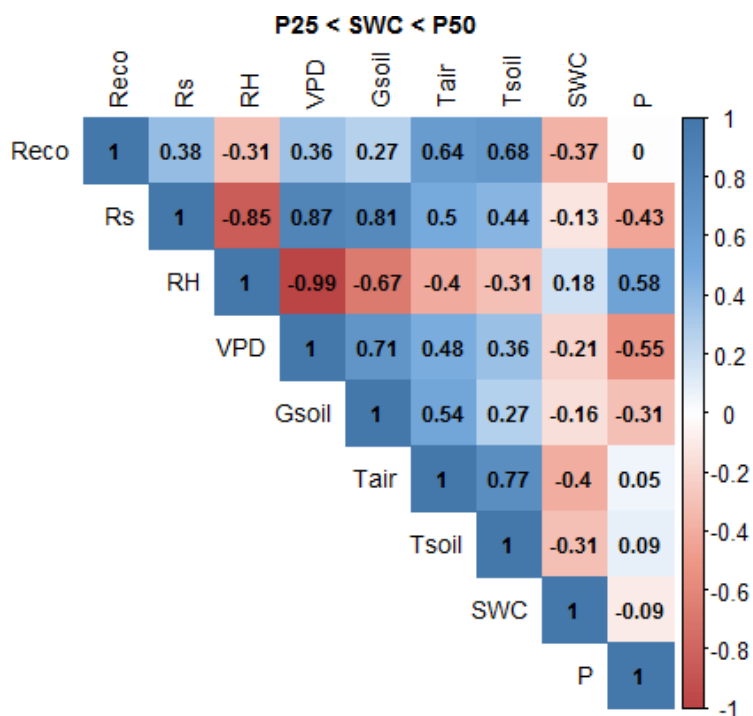
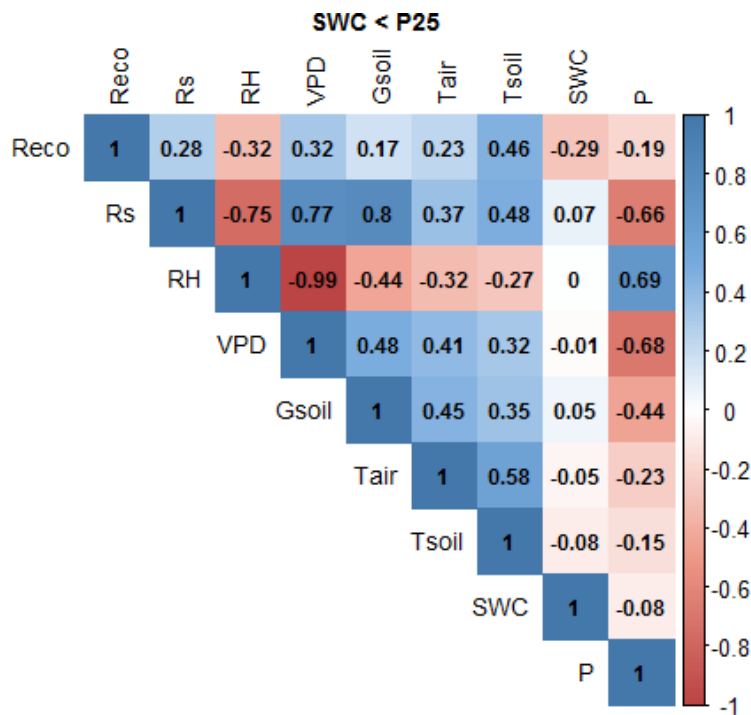
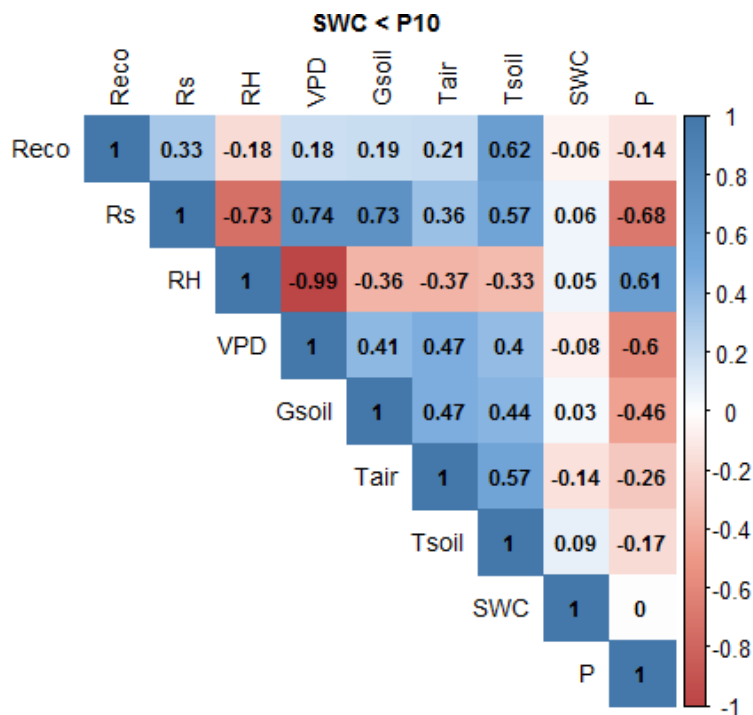


Figura A.1. Correlogramas de Spearman para $P_{25} < \text{Reco} < P_{50}$ y $P_{50} < \text{Reco} < P_{75}$. Reco = Respiración ecosistémica.

Fuente: Autora, 2020.



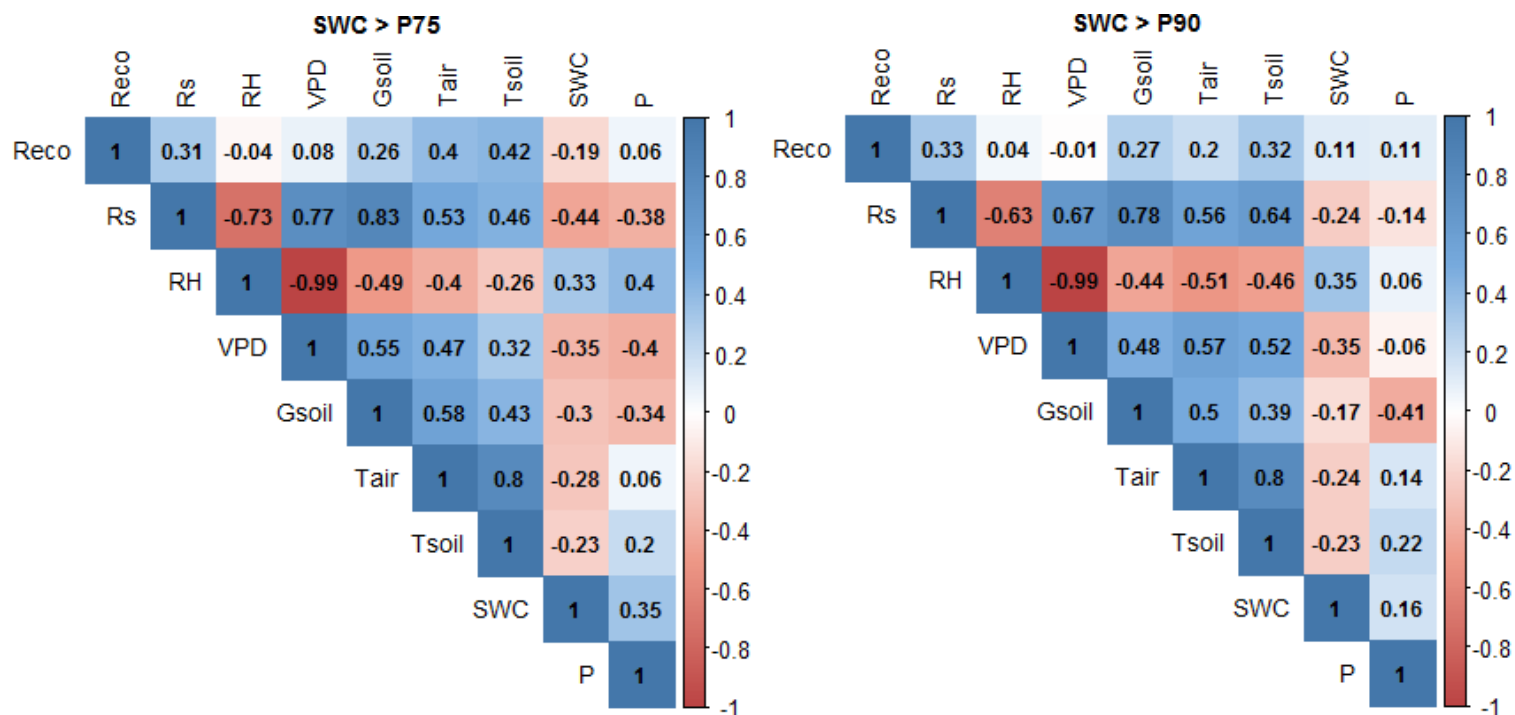
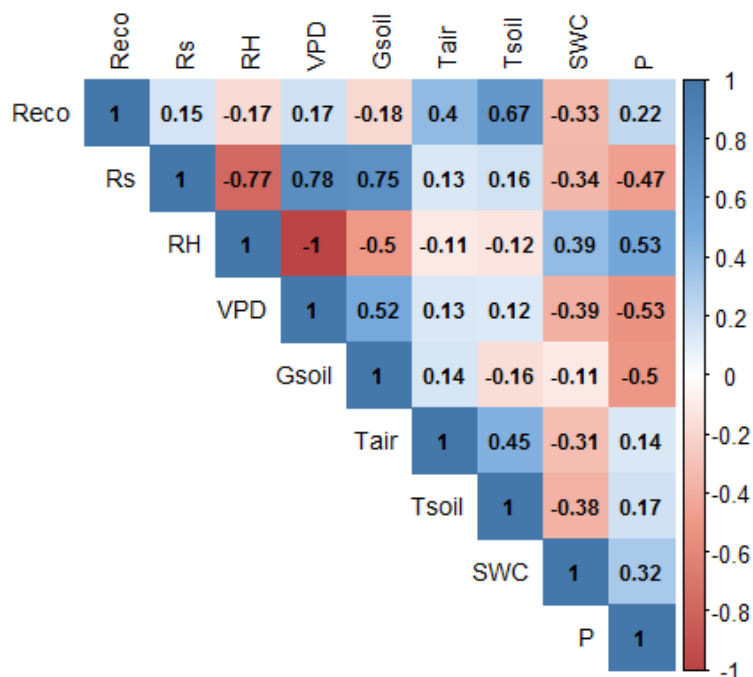


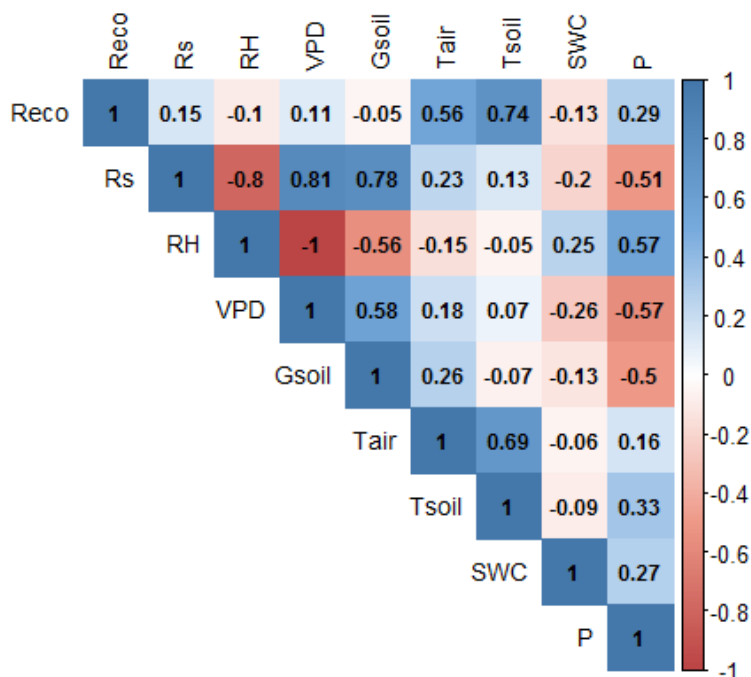
Figura A.2. Correlogramas de Spearman para análisis de percentiles de SWC. SWC = Humedad del suelo.

Fuente: Autora, 2020.

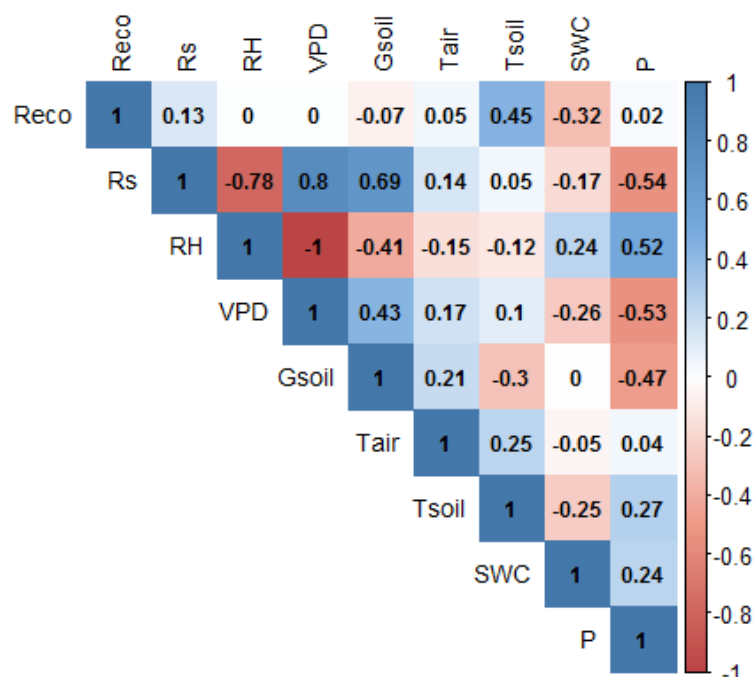
Tair < P10



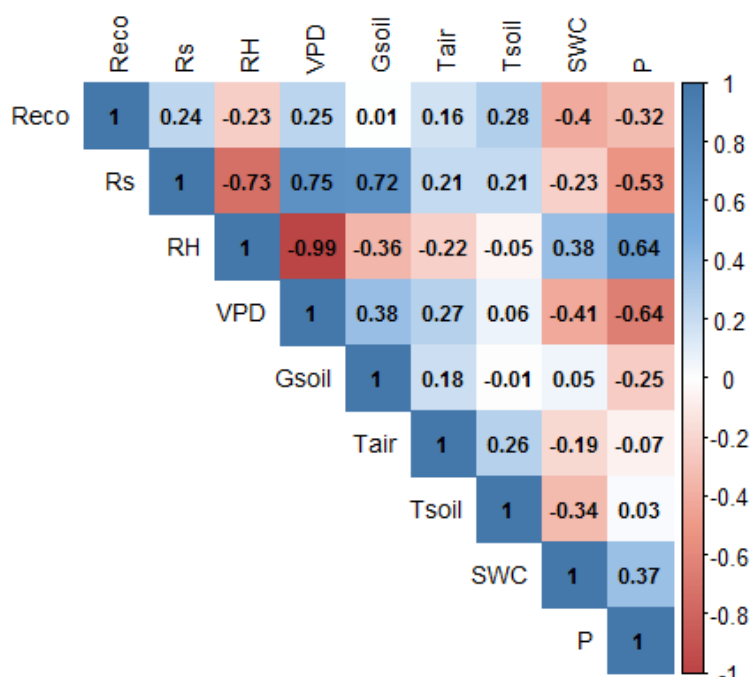
Tair < P25



P25 < Tair < P50



P50 < Tair < P75



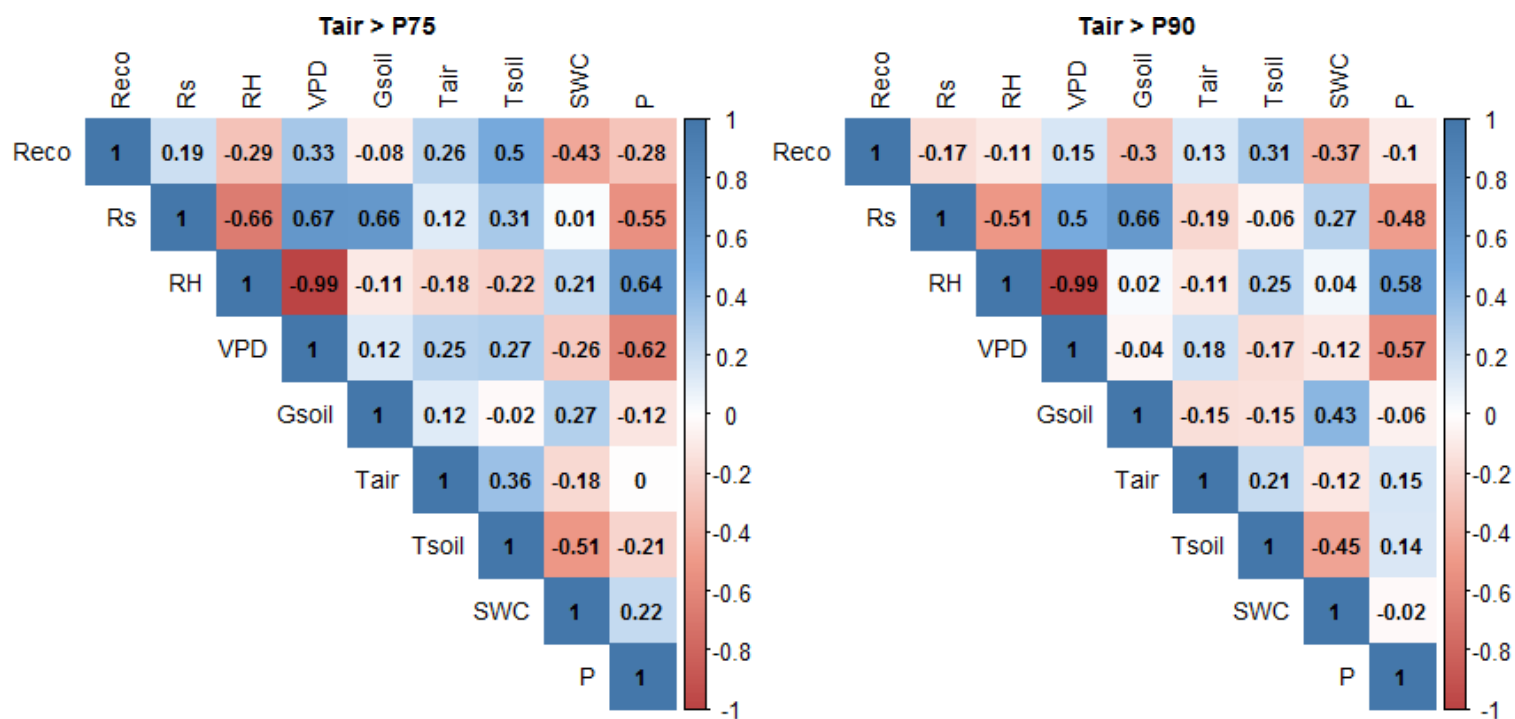
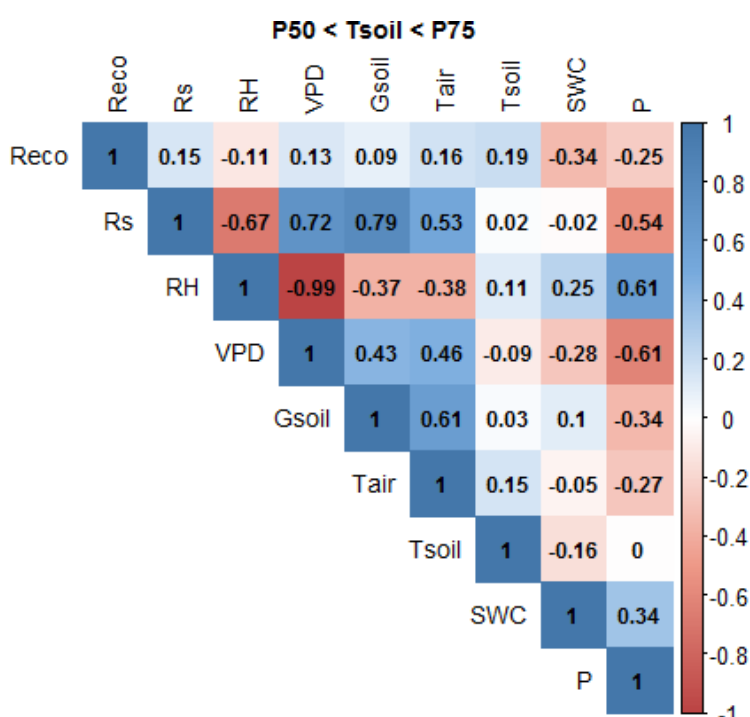
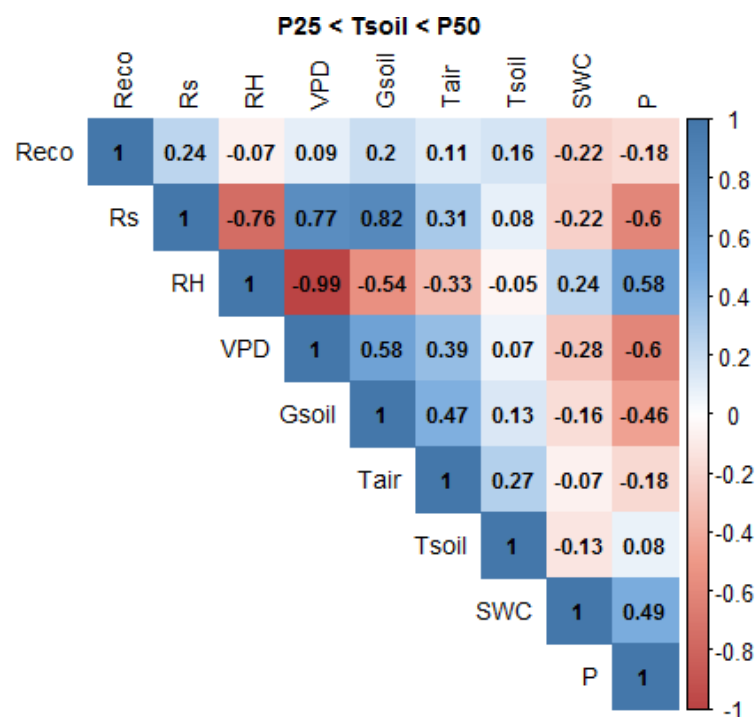
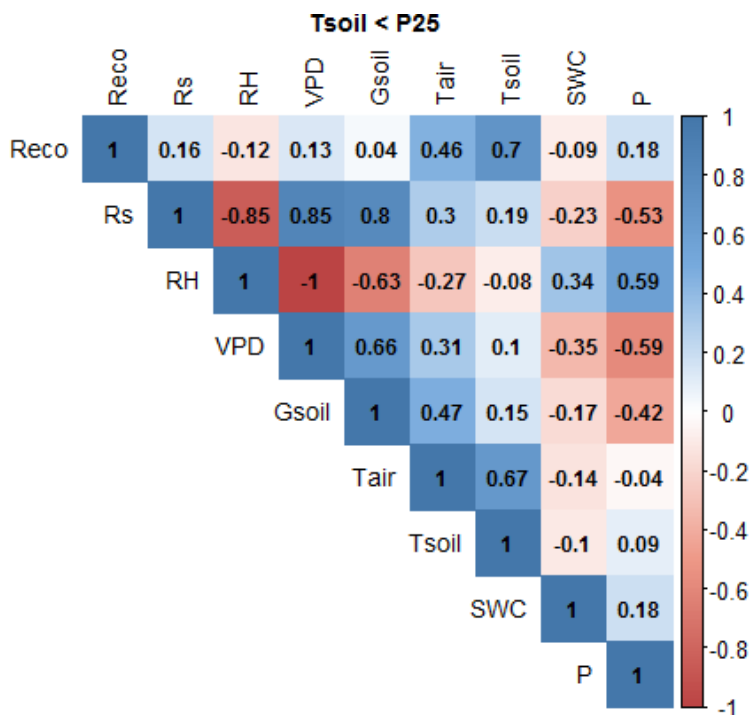
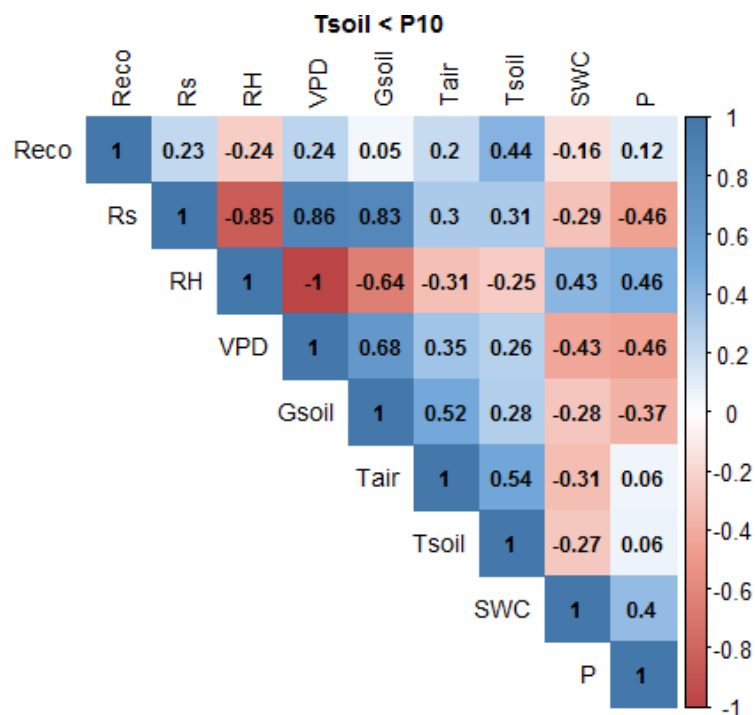


Figura A.3. Correlogramas de Spearman para análisis de percentiles de Tair. Tair = Temperatura del aire.

Fuente: Autora, 2020.



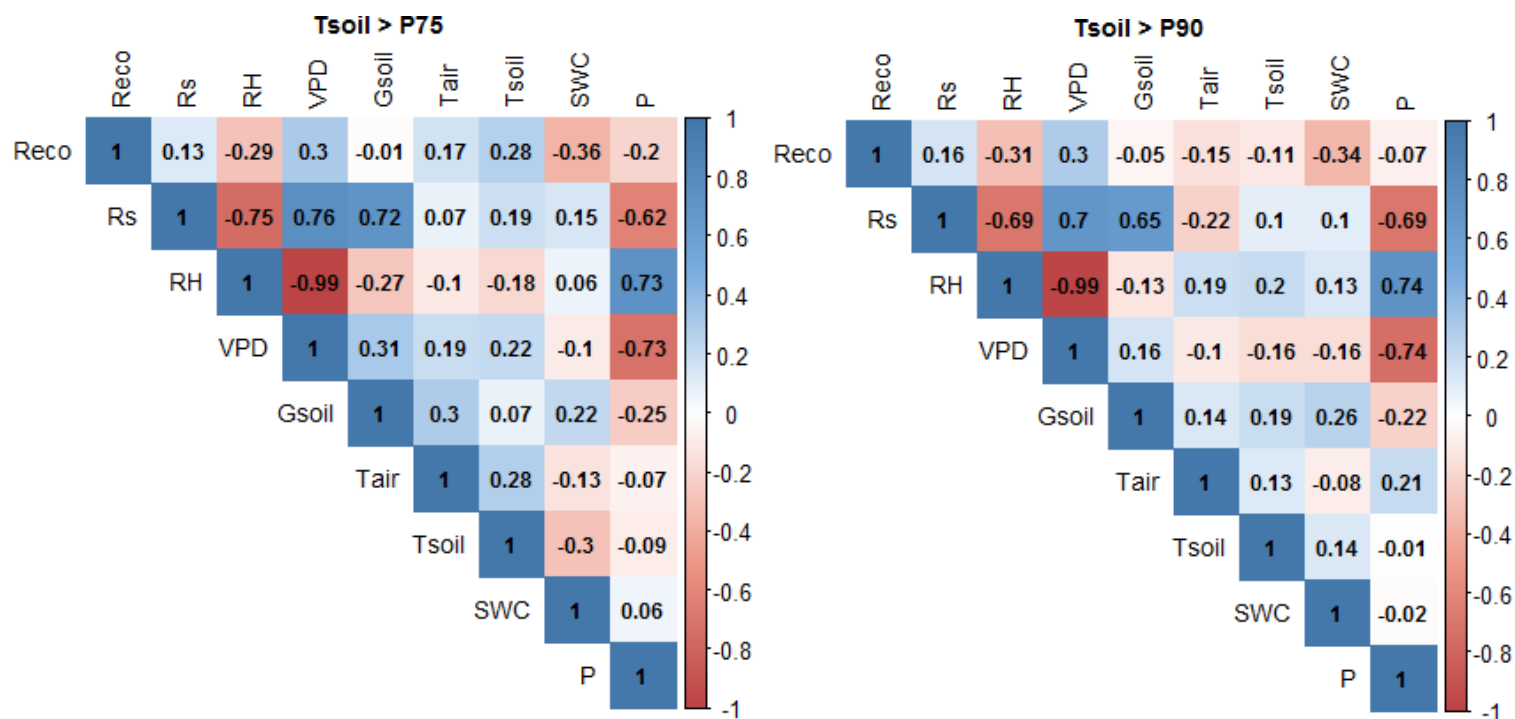


Figura A.4. Correlogramas de Spearman para análisis de percentiles de Tsoil. Tsoil = Temperatura del suelo.

Fuente: Autora, 2020.

Apéndice B. Comportamiento de las variables de interés

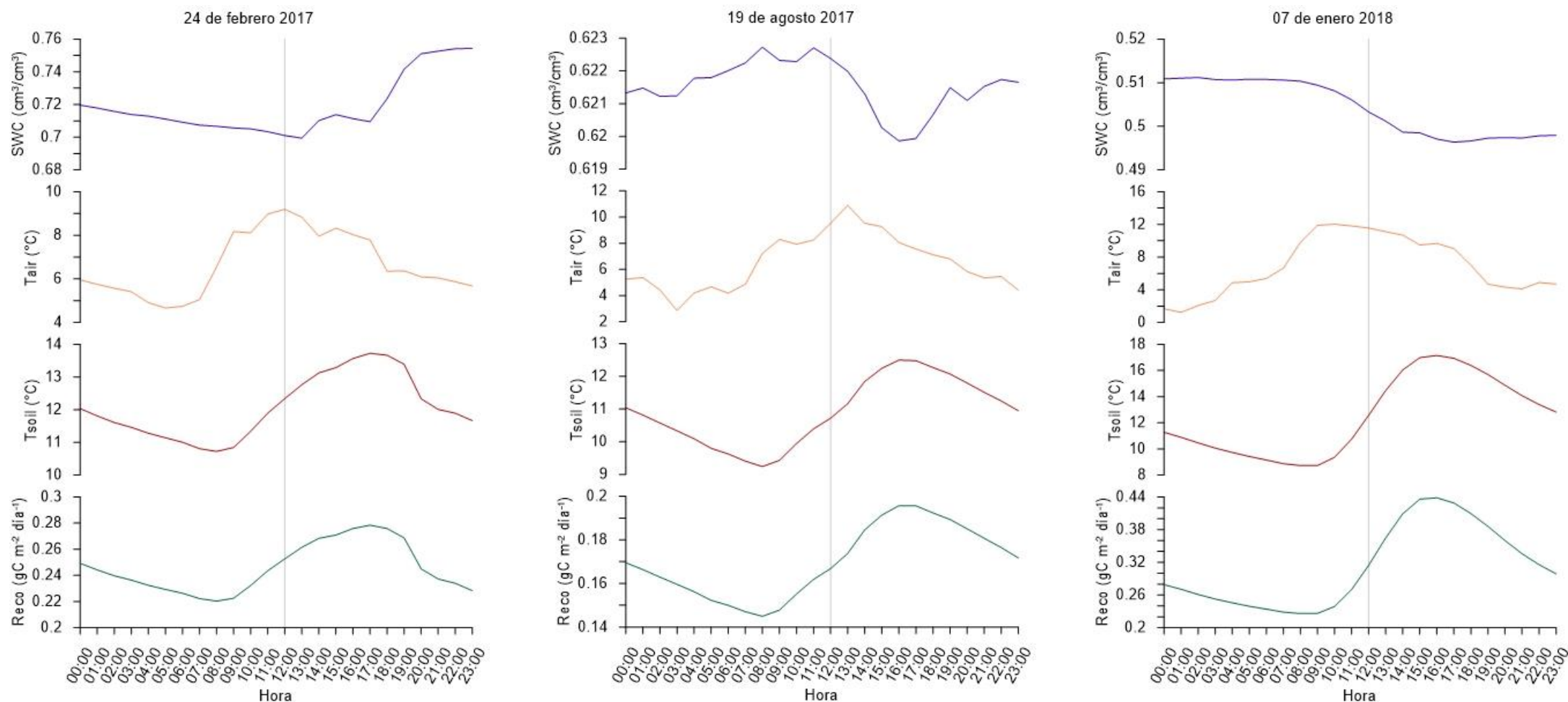


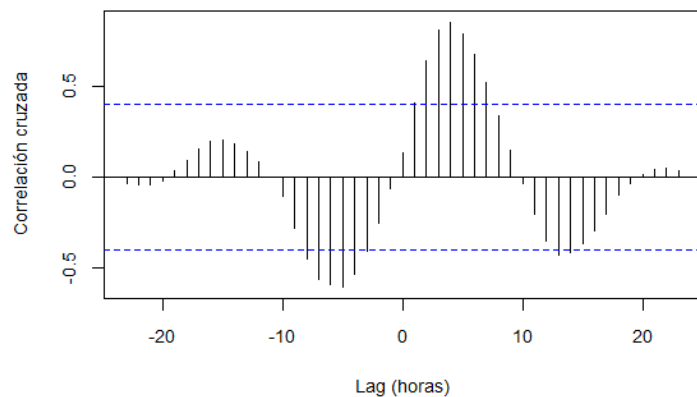
Figura B.1. Evolución temporal horaria de SWC, Tair, Tsoil y Reco para tres días de alta Reco. *Nótese la escala diferente en el eje y.

Fuente: Autora, 2020.

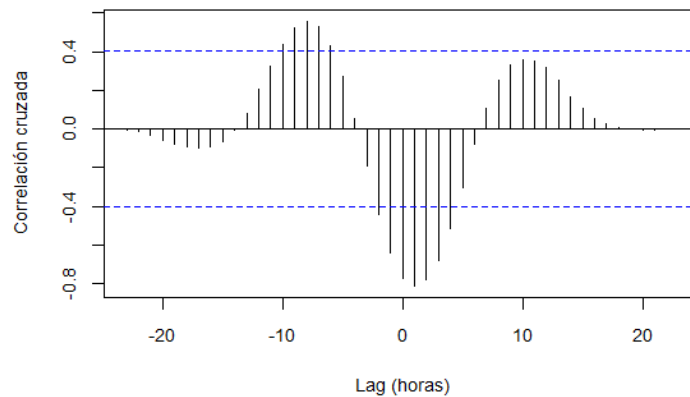


Apéndice C. Correlaciones cruzadas

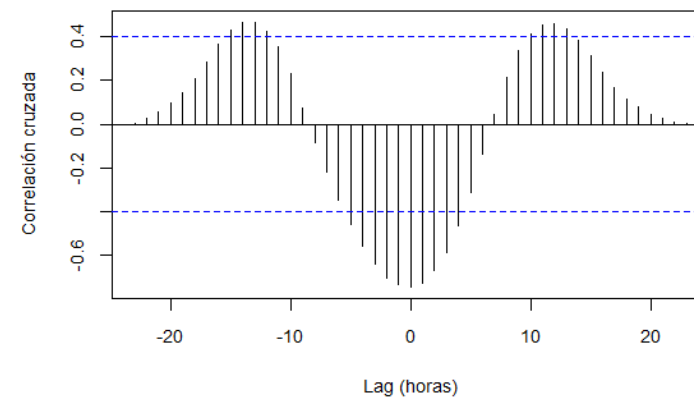
SWC - Reco (24 de febrero 2017)



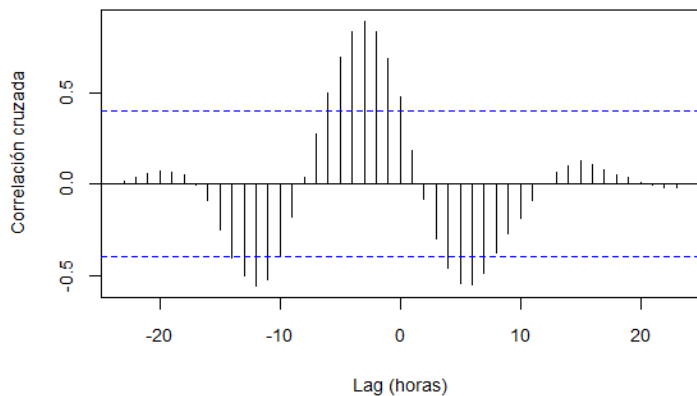
SWC - Reco (19 de agosto 2017)



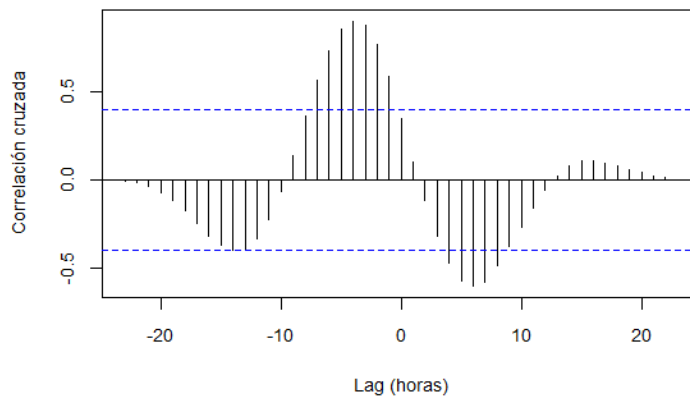
SWC - Reco (07 de enero 2018)



Tair - Reco (24 de febrero 2017)



Tair - Reco (19 de agosto 2017)



Tair - Reco (07 de enero 2018)

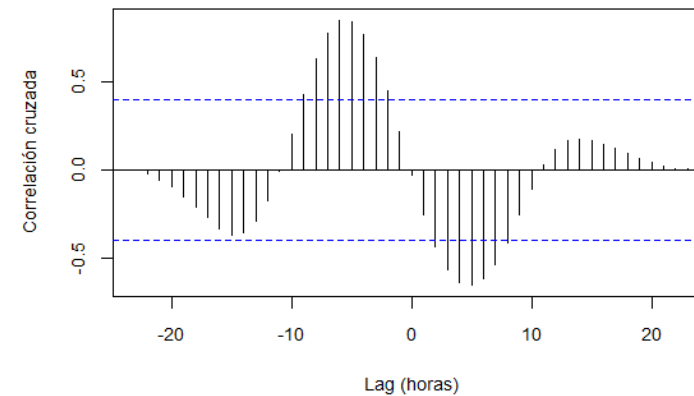


Figura C.1. Correlaciones cruzadas entre Reco con SWC y Tair en días de alta Reco. Lags positivos significan que las variables lideran el proceso de Reco, y lags negativos significan que Reco lidera las demás variables. *Series originales.

Fuente: Autora, 2020.